

научно-технический

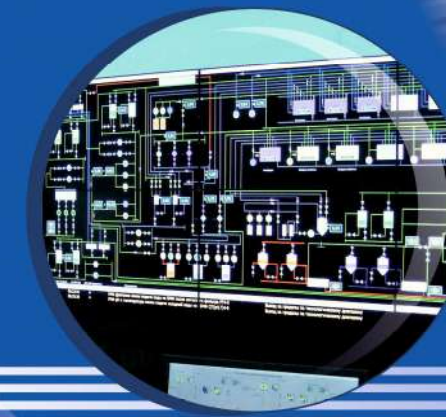
ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(57)

2024

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** – заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Ведрученко Виктор Родионович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
7. **Глинка ТADEUZY** – 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 «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ИГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – профессор кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
14. **Косарев Александр Борисович** – первый заместитель генерального директора 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** – заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ИГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзинькунь** – 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» АЛИТ, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПТРУ, 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** – head of the department «Track Maintenance Management» of STU, D. Sc., 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 «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
 13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – professor of the department «Theoretical electrical engineering» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
 14. **Kosarev Alexander Borisovich** – senior deputy of general director 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** – head 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 Jankun** – 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 ALLT, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
 24. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons and wagon 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

- Ковалев А. А., Глазов Д. В. Совершенствование конструкции и методов монтажа фиксирующих устройств контактной сети при высокоскоростном движении на этапе проектирования..... 2
- Сидоров О. А., Михайлов М. С. Исследование токоприемников электроподвижного состава, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами в катках..... 10
- Косяков А. А., Кочуров Ю. А. Определение разрядных характеристик полимерных композитных кронштейнов воздушных линий 6 – 10 кВ устройств автоматизации и продольного электроснабжения железных дорог..... 22
- Незевак В. Л. Моделирование процессов регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока с помощью устройств накопления электроэнергии..... 32
- Хаджимухаметова М. А., Сатторов С. Б., Саидвалиев Ш. У., Бозоров Р. Ш. Исследование воздействия встречного ветра на полувагон при роспуске с горба горки..... 44

Управление процессами перевозок

- Осипов А. П., Медведев Д. А. Виртуальная сцепка. Подходы и реализация..... 53
- Пищик В. Г. Применение технологии стеллажного хранения при зонном секционировании контейнерного терминала..... 64
- Лунев С. А., Гришечко С. В., Ключников М. В. Повышение эффективности работы устройств автоматической переездной сигнализации..... 73

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

- Смелянский И. В., Третьяков В. В., Конышков А. Н. Возможность повышения скорости пропуска поездов при использовании упругих подпальных прокладок в стыках..... 85

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

- Мухамедова З. Г., Бобоев Д. Ш., Якулбаев Х. М. Корреляционный анализ факторов, влияющих на контрейлерные перевозки в Узбекистане..... 94
- Петренева Е. А. Контрейлерные перевозки как метод логистического подхода..... 105

Энергетические системы и комплексы

- Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электротранспорта с рекуперацией..... 116

Электротехника

- Закарюкин В. П., Крюков А. В., Воронина Е. В. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций порталного типа..... 131

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

- Худяков П. Ю., Кисельников А. Ю., Старцев И. М. Разработка программно-аппаратного комплекса измерения токов электродов для стационарной системы мониторинга основных параметров работы электролизных ванн..... 141
- Лакин И. И. Управление рисками наступления отказов тягового подвижного состава с использованием методов теории нечетких множеств..... 149

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

А. А. Ковалев, Д. В. Глазов

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДОВ МОНТАЖА ФИКСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье описывается подход к выработке методике расчета и монтажа консолей для высокоскоростных контактных подвесок, приводится определение оптимального положения фиксатора при расчетах контактных подвесок и проектировании консолей. При проведении исследования авторы предлагают не рассматривать влияние на качество токосъема подсистемы «железнодорожный путь – подвижной состав», а оценивать как оказывающую более сильное влияние на качество токосъема подсистему «консоли с фиксатором – провода контактной сети – токоприемник».

Для этого рассмотрена схема загрузки дополнительного фиксатора под воздействием контактной сети. Авторы предлагают при проектировании участков контактной сети использовать методику определения для каждой опоры угла наклона дополнительного фиксатора и проектировать консоль индивидуально с учетом параметров для каждой конкретной опоры. Это становится возможным при применении точного расчета консолей специальными программами по каждой опоре, тем самым сводит к минимуму человеческий фактор и позволяет избежать ошибки при регулировке положения консолей, их сборке, монтаже. Поэтому рассчитанную для конкретного места консоль нет необходимости регулировать, она будет легка в изготовлении и монтаже.

В результате для проектирования контактной подвески авторы настаивают на пересмотре подхода к проектированию консолей. Это в свою очередь позволяет изменить подход к проектированию фиксаторов как главных элементов в консоли, влияющих на качество токосъема. Но применение описанного в статье метода расчета фиксатора невозможно без индивидуального расчета параметров каждой консоли в специальной программе. Авторы статьи показывают пример паспорта опоры, который является одним из документов, формируемых программой. Документ содержит исчерпывающую информацию для изготовления консоли с индивидуальными параметрами.

Ключевые слова: фиксатор, консоль, дополнительный фиксатор, изменение направления контактных проводов, геометрия консоли, оптимальное положение фиксатора.

Alexey A. Kovalev, Denis V. Glazov

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

IMPROVEMENT OF DESIGN AND METHODS OF INSTALLATION OF CONTACT NETWORK FIXING DEVICES FOR HIGH-SPEED TRAFFIC AT THE DESIGN STAGE

Abstract. The article describes an approach to developing a methodology for calculating and mounting cantilevers for high-speed contact suspensions, determining the optimal position of the latch when calculating contact suspensions and designing cantilevers. When conducting the study, the authors suggest not to consider the impact on the quality of current collection of the subsystem «railway track – rolling stock», but to evaluate the subsystem as having a stronger impact on the quality of current collection: «Cantilevers with a lock – wires of the contact network – pantograph».

For this purpose, the scheme of loading an additional retainer under the influence of a contact network is considered. The authors propose to use a methodology for determining the angle of inclination of the cantilever for each pole when designing sections of the contact network and design it individually, taking into account the parameters for each specific pole. This becomes possible when using precise calculation of steady arm by special programs for each pole, thereby minimizing the human factor and avoiding errors when adjusting the position of cantilevers, their assembly, installation. Therefore, there is no need to adjust the cantilever designed for a specific location, it will be easy to manufacture and install.

As a result, for the design of the contact suspension, the authors insist on a revision of the approach to the design of cantilevers. This, in turn, allows you to change the approach to the design of clamps, as the main elements in the console that affect the quality of current collection. But, the application of the method of calculating the lock described in the article is also not possible without an individual calculation of the parameters of each cantilever in a special program. The authors of the article show an example of a pole report, which is one of the documents generated by the programme. The document contains exhaustive information for manufacturing a cantilever with individual parameters.

Keywords: retainer, cantilever, steady arm, changing the direction of the contact wires, cantilever geometry, optimal position of the retainer.

Актуальность темы обусловлена увеличивающейся потребностью в фиксирующих конструкциях контактной сети (консолях и фиксаторах) с улучшенными характеристиками, которые позволят повысить качество монтажа и избежать ошибок на стадии их проектирования [1 – 3].

В рамках исследования авторы предлагают не рассматривать влияние на качество токосъема подсистемы «железнодорожный путь – подвижной состав», а оценить как оказывающую более сильное влияние на качество токосъема подсистему «консоли с фиксатором – провода контактной сети – токоприемник».

Для выработки оптимальных технических решений конструкций контактной сети необходимо исходить из того, что задача поддерживающих и фиксирующих конструкций контактной сети – фиксировать в пространстве провода контактной подвески, в общем случае несущий трос и контактный провод, и при этом должны выполняться следующие условия:

фиксирующие конструкции (консоли и фиксаторы) должны обеспечивать оптимальное положение контактного провода и несущего троса, позволяющее получать наилучшее качество токосъема, т. е. максимально реализовывать замысел проектировщика, теоретические расчеты специалистов;

поддерживающие конструкции (опоры, фундаменты, анкера, порталы) должны обеспечивать достаточную прочность, воспринимая на себя механические воздействия и деформации из-за различных климатических изменений; т. е. строительные конструкции должны под действием нагрузок не изменять характеристики контактной подвески, изменяя геометрию в пределах допустимых деформаций (например, прогиб менее 1/150 длины линейного элемента конструкции, если это не критично для других конструкций контактной сети).

Если проектирование строительных конструкций и в дальнейшем их установка является достаточно простой задачей, то создание оптимального комплекса фиксирующих конструкций сложнее:

имеется множество возможных вариантов конструкций. Кроме того, фиксирующие конструкции сложнее технически (имеют множество деталей в узлах со взаимным воздействием друг на друга);

замысел проектировщика и конструктора гораздо труднее реализуется при монтаже; требуется множество регулировок, часто не обеспечивающих необходимой точности.

Следует отметить, что замысел проектировщика, проектирующего систему контактной сети, необходимо реализовывать при монтаже очень точно, иначе нельзя ожидать в эксплуатации запроецированного специалистом качества токосъема. При компьютерном моделировании системы контактной сети специалисты задают

- точные координаты фиксации несущего троса и контактного провода в пространстве;
- определенные реакции со стороны фиксатора при воздействии (отжати контактного провода) токоприемником, волновых процессов при прохождении токоприемника по участку и пр.

Очевидно, что, применяя имеющиеся в настоящее время конструкции консолей и фиксаторов и существующие методы их изготовления и монтажа, нельзя говорить о гарантированной реализации замысла проектировщика и соответственно о заложенном проектом качестве токосъема.

Именно от взаимной работы элементов «консоль с фиксатором – провода контактной сети» зависит главным образом качество токосъема. Для этого определим следующее:

способ и метод проектирования системы «консоль – фиксатор», которые позволят точно и гарантированно реализовать при строительстве замысел специалистов проектировщиков;

конструкцию фиксатора, которая обеспечивает при предложенном способе проектирования и монтажа улучшенные характеристики токосъема.

Конструкция фиксатора с оптимальными параметрами. Фиксаторы контактной сети, применяемые в настоящее время, различны:

изготавливаются из различных материалов, часто это сталь или сплавы алюминия;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

имеют разную форму дополнительного фиксатора – прямую, изогнутую, с переломом;
имеют разную форму и конструкцию стойки фиксатора в зависимости от количества контактных проводов. Для двух контактных проводов это чаще всего литое изделие, штампованное, для одиночного контактного провода это либо литое изделие, штампованное, либо вертикальная труба со специальным креплением одного дополнительного фиксатора;

имеют или не имеют ветровых струн, препятствующих «раскрытию фиксатора» из специальной пружинистой стальной проволоки в форме «булавки»;

имеют гибкую или жесткую поддерживающую связь основного стержня фиксатора, идущую от консоли к основному стержню фиксатора. Такая поддерживающая связь выполняется или в виде стального тросика, или в виде трубы для особых условий по воздействию ветра;

имеют на стойке фиксатора ограничитель подъема дополнительного фиксатора (для литых стоек фиксатора это болт, регулирующий подъем дополнительного фиксатора) или не имеют его.

При проектировании фиксатора необходимо учитывать следующие требования:

фиксаторы должны иметь возможность свободного перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях до заданных пределов;

ГОСТ 32679–2017 Контактная сеть железной дороги [4] по максимальному отжатию дополнительного фиксатора токоприемником 250 мм (в *TSI ENE* имеется указание по отжатию до 225 мм для фиксаторов, имеющих конструкцию, ограничивающую подъем, и до 280 мм, если фиксатор не имеет искусственного устройства ограничения подъема);

конструкция фиксатора должна обеспечивать загрузку опорных струн не менее 15 Н;

при монтаже двух и более контактных подвесок конструкция дополнительного фиксатора должна обеспечивать свободный подъем контактной подвески, смонтированной рядом (например, на переходной опоре «В» или на воздушной стрелке);

конструкция, форма и длина дополнительного фиксатора должна обеспечивать безопасную эксплуатацию соответствующего типа токоприемника (с типовой шириной 1900 или 1600 мм);

дополнительный фиксатор должен быть загружен горизонтальными силами со стороны контактного провода на величину не менее 80 Н (экспертная оценка авторов статьи) [5].

Наряду со всеми различиями разные типы конструкции фиксаторов имеют одно сходство, что в дальнейшем реализуется при монтаже: фиксированное для определенного типа консоли и фиксатора вертикальное расстояние от контактного провода до основного стержня фиксатора, так называемое значение H_f (таблица 1).

Таблица 1 – Величина H_f согласно правилам содержания контактной сети, питающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи [6]

Участки установки фиксатора со скоростью движения свыше 120 км/ч до 160 км/ч	Минимальное допустимое расстояние по вертикали, мм, от контактного провода до основного стержня фиксатора	
	прямого	обратного
Прямые и кривые участки радиусом более 2000 м	400	500
Кривые участки радиусом до 2000 м	350	450

Понимая все недостатки нормативной литературы, Е. В. Кудряшовым [7] предложено не применять на практике заложенное в нормах значение H_f , поскольку с помощью него невозможно обеспечить допустимое отжатие контактного провода на величину до 250 мм. Было предложено задать оптимальное для каждого типа фиксатора и значения радиуса кривой (величины H_s) вертикальное расстояние от шарнира крепления дополнительного фиксатора до контактного провода.

Величина H_s

- определяет износ контактного провода (место контакта токоприемника и провода);
- влияет на загрузку опорных струн (работу всего узла, фиксирующего контактный провод);
- определяет величину отжатия контактного провода.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Решено, что оптимальным положением дополнительного фиксатора является вариант, когда ближняя к поворотному шарниру половина дополнительного фиксатора горизонтальная, как на рисунке 1 (фиксатор с переломом, классический дополнительный фиксатор КС-109).

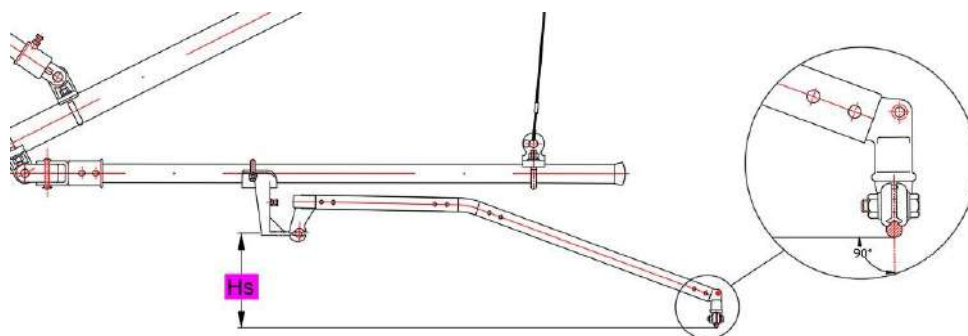


Рисунок 1 – Величина H_s при определении оптимального положения фиксатора

Таким образом, рекомендовалось проектировать фиксаторы с величиной $H_s = 300$ мм, где это возможно. На кривых малого радиуса, где существенно значение горизонтального усилия от излома контактных проводов, требуется уменьшить значение H_s . Применение унифицированных значений H_s или H_ϕ позволяет упростить проектирование, вводя единообразие, поддерживая таким образом потребности в большом объеме проектирования.

Рассмотрим схему (рисунок 2) загрузки дополнительного фиксатора под воздействием контактной сети.

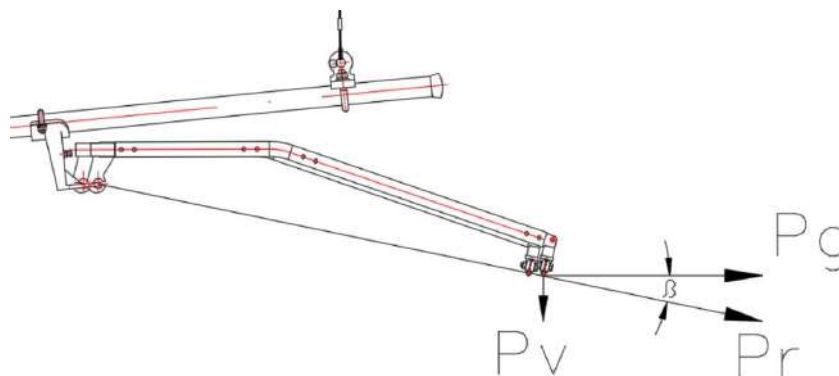


Рисунок 2 – Схема загрузки дополнительного фиксатора контактной сети

На дополнительный фиксатор в точке крепления контактного провода действуют как горизонтальные P_g , так и вертикальные силы P_v . Горизонтальные силы P_g – это усилие со стороны контактных проводов, вызванное изменением направления проводов, в общем случае это зигзаг или другое изменение направления контактных проводов (в кривом участке пути, при уходе проводов на анкеровку и пр.). Вертикальные силы P_v определяются частью веса самого дополнительного фиксатора (часть веса при этом воспринимается в шарнирном узле у стойки дополнительного фиксатора), а также весом контактных проводов, которые воспринимает фиксатор (оставшийся вес контактных проводов воспринимают опорные струны и передают нагрузку на несущий или рессорный трос) [8]. Сила P_r является результирующей от горизонтальной силы P_g и вертикальной силы P_v .

Очевидно, что все имеющиеся методики проектирования фиксаторов имеют существенный недостаток. Задавая, т. е. фиксируя, значение H_s для определенных типов фиксаторов, мы не учитываем реальное «равновесное» положение фиксатора по углу β (рисунок 3). Дополнительный фиксатор всегда монтируется под углом, который определяется высотой H_s и не соответствует углу β . Это означает, что при моделировании подвески не учитывается не только фактический вес

фиксатора, который может быть различным в зависимости от производителя, но и фактически действующая горизонтальная сила P_g , действующая со стороны контактных проводов на дополнительный фиксатор [9].

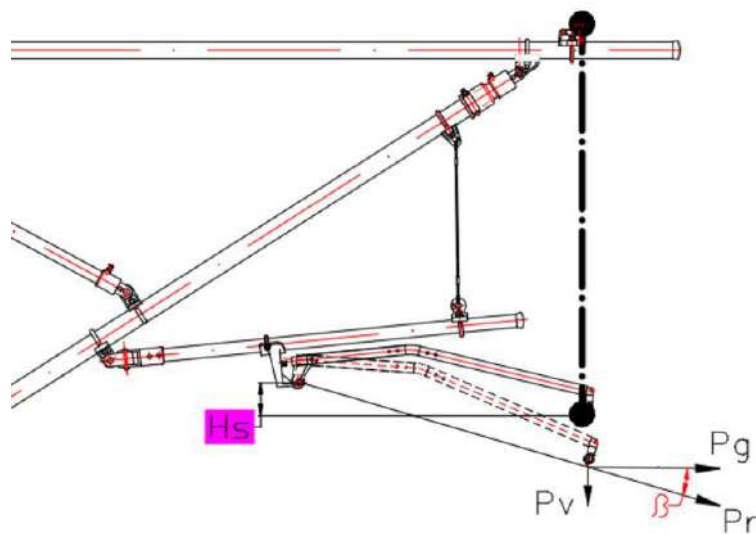


Рисунок 3 – Расхождение в угле β при монтаже фиксатора с заданным H_s

Расчеты и моделирование с учетом фактического положения фиксатора (не оптимального – «равновесного») показывают существенное влияние этого фактора на качество токосъема. Фактически происходит перераспределение нагрузки от веса контактных проводов между фиксатором и опорными струнами. Причем перераспределение происходит бессистемно, сопровождаясь небольшим, но важным изменением конструктивной высоты (высоты между несущим тросом и контактным проводом). Таким образом, необходимо при проектировании найти методику определения для каждой опоры угла β и проектировать консоль индивидуально с учетом параметров для каждой конкретной опоры [10].

Способ и метод конструирования и монтажа консоли. Назначение консолей и фиксаторов – фиксировать в пространстве контактный провод и несущий трос с проектными параметрами, как указано выше. К точности монтажа предъявляются все более высокие требования с учетом увеличивающихся скоростей движения поездов. Регулировка консоли должна позволять монтировать ее с точностью до миллиметров. Фактически же, консоль – это всегда устройство, имеющее множество элементов, которые можно смонтировать в разных положениях, тем самым мы имеем риск смонтировать консоль, которая будет отличаться от задуманной проектировщиком. Кроме того, часто сама конструкция консоли и способы ее регулировки не позволяют смонтировать контактную сеть в пространстве с проектными параметрами с миллиметровой точностью. Так, сейчас в эксплуатации имеются консоли с регулировочными узлами, расположенными на наклонной балке, или консоли, в которых регулировочные положения изменяются с шагом в несколько сантиметров. Такие консоли нельзя использовать при высоких скоростях движения. В частности, такими недостатками характеризуются наклонные швеллерные консоли.

Чтобы монтировать контактную сеть с требуемой для скоростной контактной подвески точностью, необходимо выполнить следующие условия:

применять конструкции консолей с горизонтальной регулировкой несущего троса и, по возможности, контактного провода, которые при этом не изменяют конструктивной высоты;

отказаться от проектирования консолей типоразмерами, т. е. отказаться от применения одной универсальной консоли на несколько габаритных положений, пусть даже с небольшими различиями;

при расчете положения фиксатора учитывать его наклон, как указано выше;

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

выполнять расчет геометрии консолей в проекте индивидуально для каждой консоли с учетом фактического положения опоры с консолью (с учетом уклона ближней к пути грани опоры, возвышения рельса в месте установки опоры, высоты контактного провода, конструктивной высоты подвески, бокового усилия на фиксатор со стороны контактного провода, расстояния от фиксатора до опорных струн, величины зигзага и пр.).

Общий принцип расчета геометрии консоли приведен на рисунке 4. Вид паспорта консоли, рассчитанной для изготовления, приведен на рисунке 5.



Рисунок 4 – Порядок расчета геометрии консоли



Рисунок 5 – Общий вид паспорта для изготовления консоли по результатам расчета

Только применяя точный расчет консолей специальными программами по каждой опоре, можно свести к минимуму человеческий фактор и избежать ошибок при регулировке положения консолей, их сборке, монтаже [11]. Рассчитанную для конкретного места консоль нет необходимости регулировать, ее легко изготовить и смонтировать. Только такой подход позволяет реализовать расчетные проектные параметры контактной подвески.

Итак, для проектирования контактной подвески в настоящее время необходимо пересмотреть подход к проектированию консолей. Требуется индивидуальный расчет консолей специальной программой. Это позволит изменить подход к проектированию фиксаторов как главных элементов в консоли, влияющих на качество токосъема. Применение описанного в статье метода расчета фиксатора невозможно без индивидуального расчета параметров каждой консоли в специальной программе.

Список литературы

1. Ковалев, А. А. Методика определения геометрических параметров консолей / А. А. Ковалев, А. Ю. Иванищев. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2018. – № 2 (57). – С. 73–76.
2. Галкин, А. Г. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 4 (36). – С. 69–75.
3. Микава, А. В. Разработка математической модели положения консоли по высоте опоры / А. В. Микава, А. А. Ковалев. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2016. – № 2 (20). – С. 42–49.
4. ГОСТ 32679–2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 11 с. – Текст : непосредственный.
5. Ковалев, А. А. Повышение эластичности контактной подвески за счет применения методики индивидуального расчета консолей / А. А. Ковалев, Д. В. Глазов, А. Ю. Иванищев. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2021. – № 2 (69). – С. 93–96.
6. Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи. – Москва : Центрмг, 2022. – 192 с. – Текст : непосредственный.
7. Кудряшов, Е. В. Механические расчеты контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей / Е. В. Кудряшов. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3 (24). – С. 258–269.
8. Ковалев, А. А. Применение современных методов моделирования для повышения надежности устройств контактной сети железнодорожного транспорта / А. А. Ковалев, Ф. С. Несмелов. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2012. – № 1 (2). – С. 49–52.
9. Расчетные параметры контактных подвесок. – Санкт-Петербург : ФО «УКС», 2003. – 239 с. – Текст : непосредственный.
10. Energy TSI Commission Regulation (EU) No 1301/2014 of 18 November 2014, 2014, 39 p.
11. Galkin A., Kovalev A., Okunev A. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1115, pp. 693-702.
12. Бутенко, Е. А. Совершенствование технологии обслуживания контактной сети / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2022. – С. 120–125.
13. Разработка устройств непрерывного контроля технического состояния контактной сети на основе современных технических решений / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин,

Е. А. Бутенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – № 4 (65). – С. 118–124.

References

1. Kovalev A.A., Ivanishev A.Yu. Methodology for determining the geometric parameters of consoles. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2018, no. 2 (57), pp. 73-76 (In Russian).
2. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikava A.V. The influence of the angle of inclination of the support on the height of the suspension of the contact wire relative to the level of the head for high-speed and high-speed contact suspensions. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, no. 4 (36), pp. 69-75 (In Russian).
3. Mikava A.V., Kovalev A.A. Development of a mathematical model of the console position in the height of the support. *Innovatsionnyi transport – «Innotrans» Journal*, 2016, no. 2 (20), pp. 42-49 (In Russian).
4. GOST 32679–2014. Contact line for railway. Technical requirements and control methods. Moscow, Standartinform, 2015. 11 p. (In Russian).
5. Kovalev A.A., Glazov D.V., Ivanishev A.Yu. Increasing the elasticity of the contact suspension by applying the methodology of individual calculation of consoles. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2021, no. 2 (69), pp. 93-96 (In Russian).
6. Maintenance rules for overhead catenary, feeder lines, suction lines, shunt lines and power lines. Moscow, CentrMag Publ., 2022, 192 p.
7. Kudryashov E.V. Mechanical calculations of contact suspensions based on static finite element models. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putey soobschenia – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, no. 3 (24), pp. 258-269 (In Russian).
8. Kovalev A.A., Nesmelov F.S. Application of modern modeling methods to improve the reliability of railway contact network devices. *Innovatsionnyi transport – «Innotrans» Journal*, 2012, no. 1 (2), pp. 49-52 (In Russian).
9. Design parameters of contact suspensions. Saint-Petersburg, UKS Publ., 2003, 239 p. (In Russian).
10. Energy TSI Commission Regulation (EU) No 1301/2014 of 18 November 2014, 2014, 39 p.
11. Galkin A., Kovalev A., Okunev A. Assessing remained service time of contact-line support under the constant load. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1115, pp. 693-702.
12. Butenko E.A., Smerdin A.N., Pavlov V.M. Improvement of the contact network maintenance technology. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte. Materialy XVI nauchnoy konferencii, posvyaschennoy Dnyu Rossiiskoi nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Materials of the XVI scientific conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk, 2022, pp. 120-125 (In Russian).
13. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Butenko E.A., Ermachkov G.R., Filippov V.M. Development of devices for continuous monitoring of the technical condition of the contact network based on modern technical solutions. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2022, no. 4 (65), pp. 118-124 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалев Алексей Анатольевич

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

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

Тел.: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: akovalev@usurt.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovalev Alexey Anatolievich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor, head of the department «The supply of transport», USURT.

Phone: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: akovalev@usurt.ru

Глазов Денис Вячеславович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: dglazov@usurt.ru

Glazov Denis Vyacheslavovich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Postgraduate student of the department «The supply of transport», USURT.

Phone: +7 (343) 221-24-78.

E-mail: dglazov@usurt.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ковалев, А. А. Совершенствование конструкции и методов монтажа фиксирующих устройств контактной сети при высокоскоростном движении на этапе проектирования / А. А. Ковалев, Д. В. Глазов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 2 – 10.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kovalev A.A., Glazov D.V. Improvement of design and methods of installation of contact network fixing devices for high-speed traffic at the design stage. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 2-10 (In Russian).

УДК 621.336.3

О. А. Сидоров, М. С. Михайлов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ОСНАЩЕННЫХ ВНУТРИПРУЖИНЫМИ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТАМИ В КАРЕТКАХ

Аннотация. Статья посвящена исследованию токоприемников, оснащенных системой автоматического регулирования и управляемыми упругими элементами в каретках. От обеспечения надежного токосъема зависит функционирование скоростного электроподвижного состава. Поэтому для повышения качества токосъема широкое распространение получают системы автоматического регулирования статического нажатия токоприемника. Однако их применение изменяет сжатие пружин кареток, что в конечном итоге может привести к «пробоям» пружин кареток и отрывам. Для решения этой проблемы предлагается применять в каретках внутрипружинные пневмоэлементы, обладающие изменяемой статической характеристикой. Система автоматического регулирования такого токоприемника должна осуществлять одновременное управление статическим нажатием токоприемника и статической характеристикой кареток. Авторами предложена и описана система автоматического регулирования статического нажатия рам токоприемника и статической характеристики кареток, в которой в качестве упругих управляемых элементов используются внутрипружинные пневмоэлементы. Описан алгоритм работы системы автоматического регулирования токоприемника, оснащенного управляемыми упругими элементами в каретках. Для проверки перспективности предложенной системы автоматического регулирования разработана трехмассовая математическая модель токоприемника, оснащенного внутрипружинными пневмоэлементами в каретках. Разработанная математическая модель реализована в программном комплексе MATLAB Simulink. Выполнена модернизация испытательной установки для получения статических характеристик кареток токоприемников, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения внутрипружинных пневмоэлементов в каретках токоприемников при применении системы автоматического регулирования, которая позволяет избежать полного сжатия упругих элементов кареток, приводящего к вертикальным ударам, вызывающим резкий рост контактного нажатия и отрывы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-10188.

Ключевые слова: токосъем, токоприемник, система автоматического регулирования, каретки, управляемый упругий элемент, внутрипружинный пневмоэлемент, контактное нажатие.

Oleg A. Sidorov, Mikhail S. Mikhailov

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

RESEARCH OF ELECTRIC ROLLING STOCK PANTOGRAPHS EQUIPPED WITH INTRA-SPRING PNEUMATIC ELEMENTS IN THE PANHEAD SUSPENSION

Abstract. The article is devoted to the research of a pantograph equipped with an automatic control system and controlled elastic elements in a panhead suspension. The functioning of high-speed electric rolling stock depends on

ensuring reliable current collection. Therefore, to improve the quality of current collection, automatic control systems for static force of the pantograph are becoming widespread. However, their use changes the compression of springs of the panhead suspension, which can ultimately lead to breakdowns of the panhead suspension springs and breakaways. To solve this problem, it is proposed to use intra-spring pneumatic elements in the panhead suspension that have a variable static characteristic. The automatic control system of such a pantograph must simultaneously control the static force of the pantograph and the static characteristics of the panhead suspension. The authors proposed and described a system for automatic regulation of a pantograph, equipped with a system for automatic regulation of the contact force of the pantograph and the static characteristics of the panhead suspension, in which intra-spring pneumatic elements are used as elastic controlled elements. An algorithm for the operation of an automatic control system for a pantograph equipped with controlled elastic elements in the panhead suspension is described. To test the prospects of the proposed automatic control system, a three-mass mathematical model of a pantograph equipped with intra-spring pneumatic elements in panhead suspension has been developed. The developed mathematical model is implemented in the MATLAB Simulink software package. A test setup has been developed to obtain the static characteristics of pantograph panhead suspension equipped with intra-spring pneumatic elements. The results obtained indicate the possibility of using intra-spring pneumatic elements in pantograph panhead suspension when using an automatic control system. It allows you to avoid complete compression of the elastic elements of the panhead suspension, leading to vertical impacts, causing a sharp increase in contact pressure and separation.

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 23-29-10188.

Keywords: current collection, pantograph, automatic control system, panhead suspension, controlled elastic element, intra-spring pneumatic element, contact force.

В настоящее время для высокоскоростного железнодорожного движения преимущественно применяется электроподвижной состав, к которому предъявляются значительные требования по надежности, экономичности и экологичности. В том числе этим требованиям должна соответствовать система токосяема, поскольку от ее надежной работы зависит функционирование скоростного поезда в целом.

Контактное нажатие является одним из основных параметров, определяющих качество токосяема, поэтому поддержание стабильного контакта является одной из основных задач при оптимизации процесса токосяема. Выбор оптимального уровня нажатия является одной из главных задач при организации процесса токосяема [1, 2]. При снижении контактного нажатия, сопровождающемся отрывами полозов, износ контактных элементов резко возрастает, что связано с резким ростом электроэрозионной составляющей износа из-за значительного усиления искрения, тогда как повышенное контактное нажатие хотя и увеличивает механическую составляющую износа, но не приводит к резкому росту износа и нарушениям токосяема [3].

Поэтому в целях оптимизации процесса токосяема в настоящее время широкое распространение получают системы автоматического регулирования (САР) статического нажатия токоприемников. За счет повышения уровня контактного нажатия снижается риск отрывов полозов и возникновения искрения, что представляет основную угрозу в процессе токосяема [4, 5].

Увеличение статического нажатия токоприемника приводит также и к увеличению сжатия упругих элементов кареток, что может привести к их полному сжатию («пробою»). Это в конечном итоге приводит к вертикальным ударам, приводящим к нарушениям токосяема: отрывам полоза и искрению. Поэтому поддержание сжатия упругих элементов кареток в регламентированных пределах является важным при использовании систем автоматического регулирования статического нажатия токоприемников.

Для решения данной проблемы в каретках могут быть использованы пневматические элементы с управляемой статической характеристикой, которая является зависимостью силы, создаваемой упругим элементом каретки, от ее сжатия. При этом необходимо обеспечить минимальное влияние на жесткость каретки (угол наклона статической характеристики), поскольку она выбирается на этапе проектирования для обеспечения оптимального токосяема. Поэтому управление статической характеристикой необходимо осуществлять за счет создания дополнительной силы разжатия кареток, т. е. путем вертикального смещения характеристики [6].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В ОмГУПСе предложена конструкция каретки токоприемника (рисунок 1), которая позволяет поддерживать сжатие упругих элементов кареток в регламентированных значениях за счет использования управляемых внутрипружинных пневмоэлементов (ВПЭ), обладающих изменяемой статической характеристикой [7].

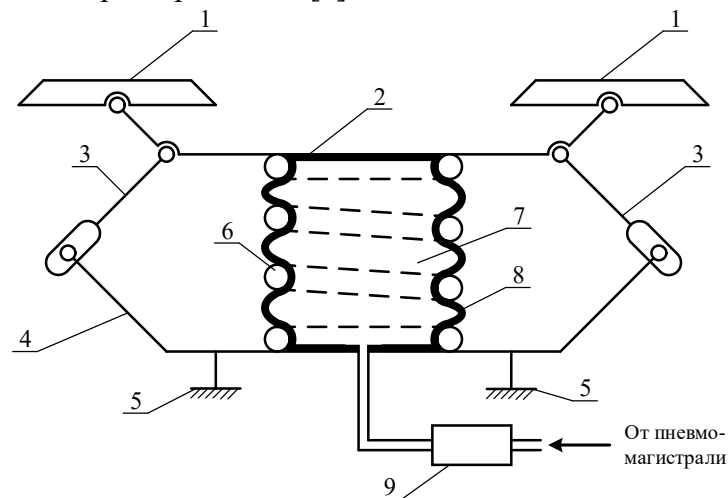


Рисунок 1 – Каретка токоприемника, оснащенная внутрипружинным пневмоэлементом: 1 – контактные элементы; 2 – держатель; 3 – тяги; 4 – основание; 5 – рама; 6 – цилиндрическая пружина; 7 – гибкий пневмоэлемент; 8 – оболочка пневмоэлемента; 9 – регулятор давления

Контактные элементы 1 устанавливаются на держателе 2, который посредством тяг 3 соединяется с основанием 4, закрепленным на верхней раме токоприемника 5. Упругое расчленение контактных элементов 1 и верхней рамы 5 обеспечивается за счет цилиндрической пружины 6. Пневматический элемент 7, устанавливаемый внутри цилиндрической пружины 6 так, чтобы его оболочка 8 прижималась к внутренним поверхностям цилиндрической пружины 6, необходим для создания дополнительной силы, направленной на разжатие пружины в случае, если в процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвески ее среднее сжатие изменяется вследствие работы системы автоматического регулирования статического нажатия токоприемника и при влиянии других факторов.

Для изготовления оболочки пневмоэлемента 8 должен использоваться эластичный термо- и морозостойкий материал, поскольку каретки токоприемников в процессе их эксплуатации подвергаются воздействию как высоких температур вследствие нагрева токопроводящих элементов токоприемника в процессе токосъема, так и низких температур при их эксплуатации в условиях холодного климата. Одним из подходящих для указанных целей материалов, применяемых для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов, могут являться силиконы, поскольку они характеризуются высокой эластичностью при значительной стойкости к влиянию внешних факторов и износостойкости.

Подача сжатого воздуха в полость пневмоэлемента 7 приводит к расширению гибкой оболочки 8, и она прижимается к внутренним поверхностям витков пружины 6, держателя 2 и основания 4, что создает дополнительную силу, направленную на разжатие пружины и влияющую на статическую характеристику каретки. Поскольку гибкая оболочка 8 пневмоэлемента 7 обладает высокой эластичностью, вносимый ею вклад в жесткость каретки мал по сравнению с жесткостью пружины 6, поэтому она не оказывает негативного влияния на динамику взаимодействия токоприемника и контактной подвески. Кроме того, пневмоэлемент выполняет роль демпфера за счет возникновения диссипативных сил в гибкой оболочке 8, что благоприятно влияет на процесс токосъема, снижая влияние резонансных явлений.

В Омском государственном университете путей сообщения предложена система синхронного регулирования статического нажатия токоприемника и статической характеристики кареток [8]. Регулирование статического нажатия осуществляется за счет изменения давления

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

в подъемном резинокордном элементе. Для регулирования статической характеристики кареток применяются внутрипружинные пневмоэлементы, статическая характеристика которых изменяется за счет изменения давления в их полости.

В токоприемнике, оснащем САР статического нажатия рам 1 (рисунок 2), в качестве подъемного элемента используется резинокордный элемент (РКЭ) 2, а в качестве упругих элементов кареток – внутрипружинные пневмоэлементы 3. Для регулирования силы статического нажатия изменяется давление в полости РКЭ с помощью РД1. Регулирование статической характеристики кареток осуществляется за счет изменения давления в полости ВПЭ с помощью РД2. Регуляторы РД1 и РД2 управляются блоком управления (БУ), который получает информацию от датчика нажатия 5, установленного на ползое 4 токоприемника. Сигналы на подъем и опускание токоприемника передаются с пульта управления (ПУ), установленного в кабине машиниста, на БУ, управляющий работой ЭПР1 и ЭПР2. В случае необходимости, например, при наличии гололеда на контактном проводе, машинист может с ПУ вручную увеличить нажатие, подав сигнал на вход БУ.

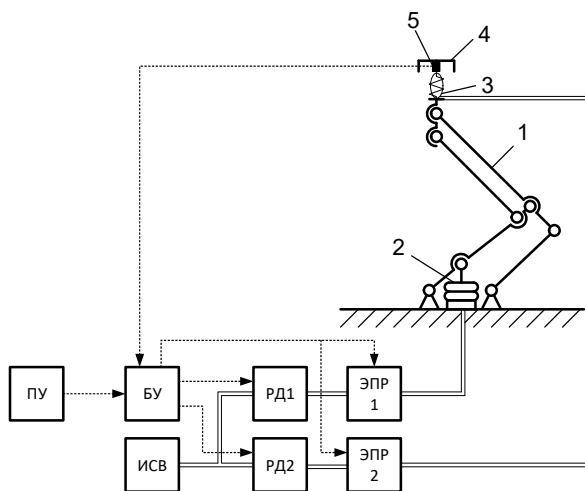


Рисунок 2 – Принципиальная схема САР токоприемника, оснащенного ВПЭ в каретках: 1 – рамы токоприемника; 2 – подъемный пневмоэлемент; 3 – внутрипружинный пневмоэлемент; 4 – ползое токоприемника; 5 – датчик контактного нажатия; БУ – блок управления; ПУ – пульт управления; ИСВ – источник сжатого воздуха; РД – регулятор давления; ЭПР – электропневматический распределитель

Синхронное регулирование статического нажатия в подъемном пневмоэлементе и ВПЭ каретки выполняется на основе ПИ-алгоритма управления давлением воздуха в указанных пневмоэлементах. Структурная схема ПИ-регулятора САР токоприемника, оснащенного ВПЭ в каретках, приведена на рисунке 3.

В случае, когда номинальный уровень статического нажатия рам токоприемника $P_{p0} = 100$ Н достаточен для обеспечения качественного токосъема, в РКЭ с помощью РД1 поддерживается давление, необходимое для обеспечения номинального статического нажатия. В то же время в ВПЭ с помощью РД2 поддерживается минимально допустимое давление $p_{ВПЭ \min} = 10$ кПа, которое необходимо для обеспечения работоспособности ВПЭ.

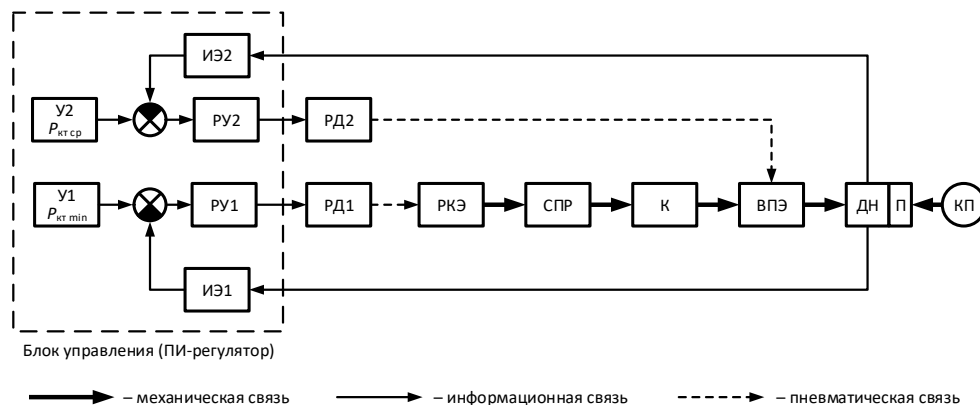


Рисунок 3 – Структурная схема ПИ-регулятора САР токоприемника, оснащенного ВПЭ в каретках:
У – уставка; РД – регулятор давления; РУ – регулятор уставки; ИЭ – интегрирующий элемент;
РКЭ – подъемный резинокордный элемент; СПР – система подвижных рам; К – каретка;
ВПЭ – внутрипружинный пневмоэлемент; ДН – датчик нажатия; П – ползое; КП – контактная подвеска

Нарушения токосъема, приводящие к увеличению разброса контактного нажатия, фиксируются с помощью ИЭ1, получающего информацию от ДН об уровне контактного нажатия. ИЭ1 отслеживает в интервале времени наблюдения ($t_{\text{набл}}$) долю времени ($t_{\text{кт min}}$), в течение которого контактное нажатие опускается ниже минимально допустимого уровня $P_{\text{кт min}} = 60$ Н. Использование И-алгоритма регулирования позволяет минимизировать влияние на работу системы регулирования одиночных выбросов. При превышении уставки У1, устанавливаемой на уровне 5 %, РУ1 повышает уставку РД1, за счет чего давление в РКЭ увеличивается, что приводит к увеличению статического нажатия токоприемника, достаточному для того, чтобы контактное нажатие не снижалось до уровня повышенного риска возникновения искрения и отрывов ($P_{\text{кт}} = 40$ Н) (рисунок 4). Повышение статического нажатия приводит к одновременному увеличению сжатия упругих элементов кареток, что в дальнейшем может привести к их «пробоям».

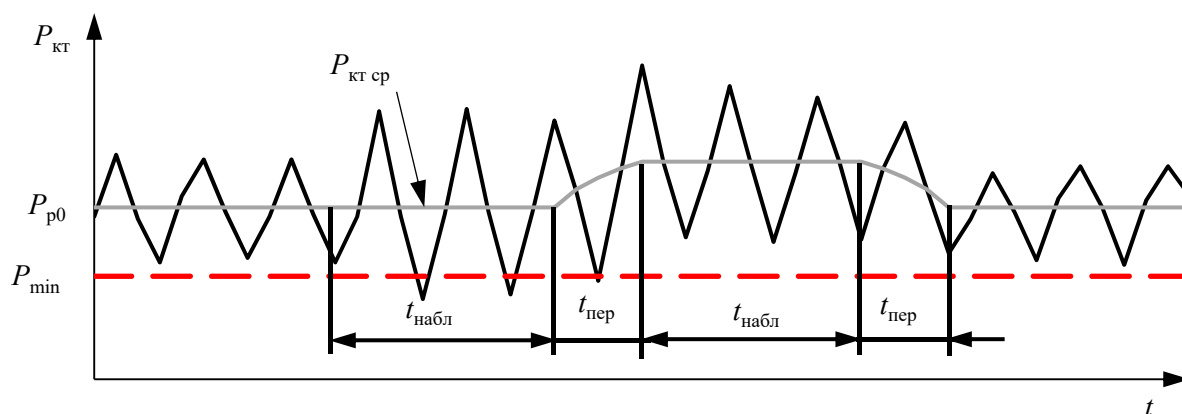


Рисунок 4 – Принцип действия САР статического нажатия

Поэтому для предотвращения «пробоя» упругих элементов и поддержания среднего сжатия упругих элементов каретки (Δh_k) близким к 50 % от их предельного сжатия ИЭ2 отслеживает в течение интервала времени наблюдения ($t_{\text{набл}}$) средний уровень контактного нажатия за счет информации, поступающей на него от ДН. ИЭ2 передает информацию о среднем уровне контактного нажатия на элемент сравнения, и при превышении уставки, принятой равной номинальному статическому нажатия ($P_p = 100$ Н), РУ2 увеличивает уставку РД2, за счет чего повышается давление в ВПЭ до уровня, достаточного для удержания сжатия ВПЭ в регламентированных значениях. Принцип действия САР статической характеристики каретки приведен на рисунке 5.

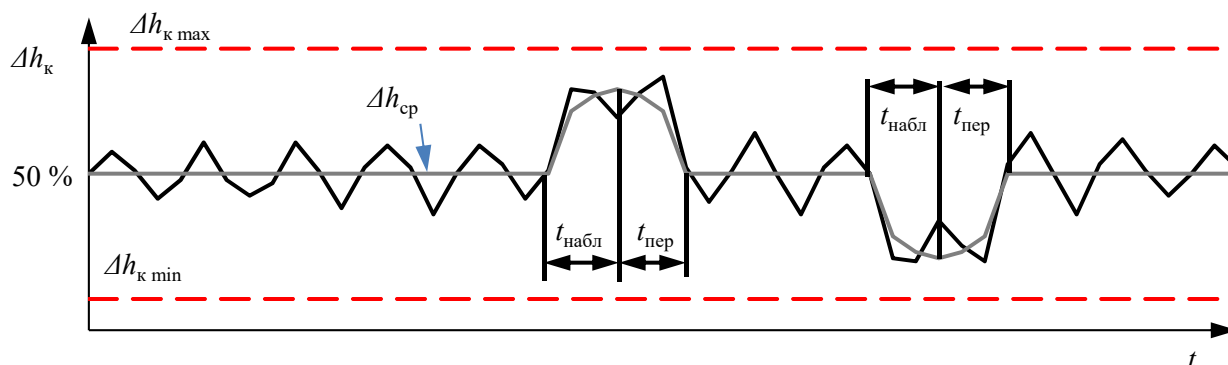


Рисунок 5 – Принцип действия САР статической характеристики каретки

При стабилизации контакта разброс контактного нажатия снижается и, соответственно, уменьшается отслеживаемая ИЭ1 доля времени $t_{\text{кт min}}$, в связи с чем РУ1 понижает уставку РД1. Это приводит к понижению давления в РКЭ и, соответственно, статического нажатия токоприемника. Одновременно с этим ИЭ2 регистрирует снижение среднего контактного

нажатия, что приводит к понижению уставки РД2 с помощью РУ2 и, соответственно, к снижению давления в полости ВПЭ.

Для оценки динамики взаимодействия токоприемника, оснащенного САР с ПИ-алгоритмом регулирования, и контактной подвески целесообразно использовать математические модели токоприемников с приведенными массами, поскольку они позволяют производить расчет влияния изменения параметров токоприемников и контактной подвески на процесс токосъема с достаточной точностью при минимальных затратах вычислительных мощностей [9]. Для расчета авторами разработана трехмассовая модель токоприемника (рисунок 6), в которой реальный токоприемник разделен на три приведенные массы: верхний узел (1), верхнюю раму (2) и нижнюю раму (3).

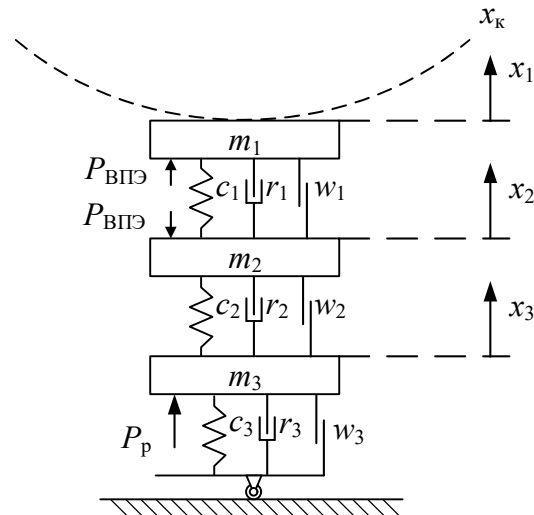


Рисунок 6 – Расчетная схема трехмассовой модели токоприемника

В расчетной схеме приняты следующие обозначения: x_1 – высотное положение верхнего узла токоприемника; x_2 – высотное положение верхней рамы; x_3 – высотное положение нижней рамы; x_k – положение контактного провода; m_1 – масса верхнего узла токоприемника; m_2 – приведенная масса верхней рамы; m_3 – приведенная масса нижней рамы; c_1 – жесткость кареток; c_2 – жесткость верхней рамы; c_3 – жесткость нижней рамы; r_1 – вязкое трение в каретке; r_2 – вязкое трение в верхней раме; r_3 – вязкое трение в нижней раме; w_1 – сухое трение в каретке; w_2 – сухое трение в верхней раме; w_3 – сухое трение в нижней раме; P_p – статическое нажатие токоприемника; $P_{ВПЭ}$ – сила, создаваемая внутрипружинным пневмоэлементом.

На этапе выбора основных параметров и алгоритмов системы автоматического регулирования в расчетах приняты следующие допущения:

амплитуда вертикальных колебаний нижней рамы является малой по сравнению с полным диапазоном высот поднятия токоприемника, что позволяет принять статическое нажатие токоприемника постоянным;

нижняя рама принята абсолютно жесткой, в связи с чем в расчетах ее жесткость не учитывается;

изменение высотного положения точки контакта полоза и контактного провода представлено в виде абсолютно жесткой синусоиды;

аэродинамические силы, воздействующие на элементы конструкции токоприемника, не учитываются;

основание токоприемника не совершает вертикальных перемещений;

не учитывается вращательное движение полоза токоприемника;

не учитывается перераспределение контактного нажатия по ширине полоза токоприемника.

Одним из наиболее распространенных способов описания динамических систем являются уравнения Лагранжа. В том числе они могут быть использованы при составлении уравнений

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

движения математической модели токоприемника с приведенными массами. Для этого для каждого тела, входящего в систему, составляется дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \Pi}{\partial q} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} = Q_q; \quad q \in [x_1, x_2, x_3], \quad (1)$$

где q – обобщенная координата;

T – кинетическая энергия системы;

Π – потенциальная энергия системы;

Φ – диссипативная функция;

Q_q – обобщенная сила по обобщенной координате q .

Разработанная математическая модель токоприемника, взаимодействующего с жесткой контактной подвеской, требует составления трех уравнений Лагранжа. Полученные уравнения дифференцируются, в результате чего составляется система дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 (x_1 - x_2) + r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + P_{\text{ВПЭ}}; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_1 (x_1 - x_2) + c_2 (x_2 - x_3) - r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - P_{\text{ВПЭ}}; \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_2 (x_2 - x_3) + c_3 x_3 - r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + r_3 \dot{x}_3 = w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3) + P_p. \end{cases} \quad (2)$$

Использование метода штрафных функций позволяет моделировать взаимодействие токоприемника и контактной подвески с достаточной достоверностью [9]. Для этого в систему вводится контактная сила упругости, зависящая от «зазора» между контактным проводом и полозом. При этом принцип непроникновения игнорируется и «зазор» может принимать как положительные (отрыв полоза от контактного провода), так и отрицательные (наличие контакта) значения:

$$\begin{cases} P_{\text{кт}} = c_k (x_{\text{к.п}} - x_1), & (x_{\text{к.п}} - x_1) \leq 0; \\ P_{\text{кт}} = 0, & (x_{\text{к.п}} - x_1) > 0, \end{cases} \quad (3)$$

где c_k – жесткость контакта (принимается равной 50 кН/м);

$x_{\text{к.п}} - x_1$ – зазор между контактным проводом и полозом токоприемника.

Математическое моделирование внутрипружинных пневмоэлементов является сложной задачей и требует учета значительного числа факторов, влияющих на работу ВПЭ. В связи с этим разработка аналитической модели, учитывающей специфику ВПЭ, вызывает значительные трудности. Поэтому для получения параметров внутрипружинных пневмоэлементов проведены экспериментальные исследования в пределах рабочего хода кареток (0 – 50 мм). Для описания силы, создаваемой внутрипружинным пневмоэлементом, может быть использовано уравнение [10]

$$P_{\text{ВПЭ}} = c_{\text{пэ}} (p_{\text{пэ}}) \cdot \Delta h_k + P_{\text{пэ0}} (p_{\text{пэ}}), \quad (4)$$

где $c_{\text{пэ}}$ – жесткость внутрипружинного пневмоэлемента, Н/м;

Δh_k – сжатие внутрипружинного пневмоэлемента ($\Delta h_k = x_1 - x_2$), м;

$p_{\text{пэ}}$ – избыточное давление в пневмоэлементе, Па;

$P_{\text{пэ0}}$ – сила внутрипружинного пневмоэлемента при нулевом сжатии, Н.

Исследование статической характеристики внутрипружинных элементов осуществлялось на испытательном стенде, разработанном на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения. Структурная схема и общий вид стенда приведены на рисунке 7. На схеме приняты следующие обозначения: ВПЭ – внутрипружинный пневмоэлемент; БУ – блок управления; ЭМП – электро-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

механический привод; ИСВ – источник сжатого воздуха; РД – регулятор давления; ЭПК – электропневматический клапан; РУ – регистрирующее устройство; ДН – датчик нажатия; ДП – датчик перемещения.

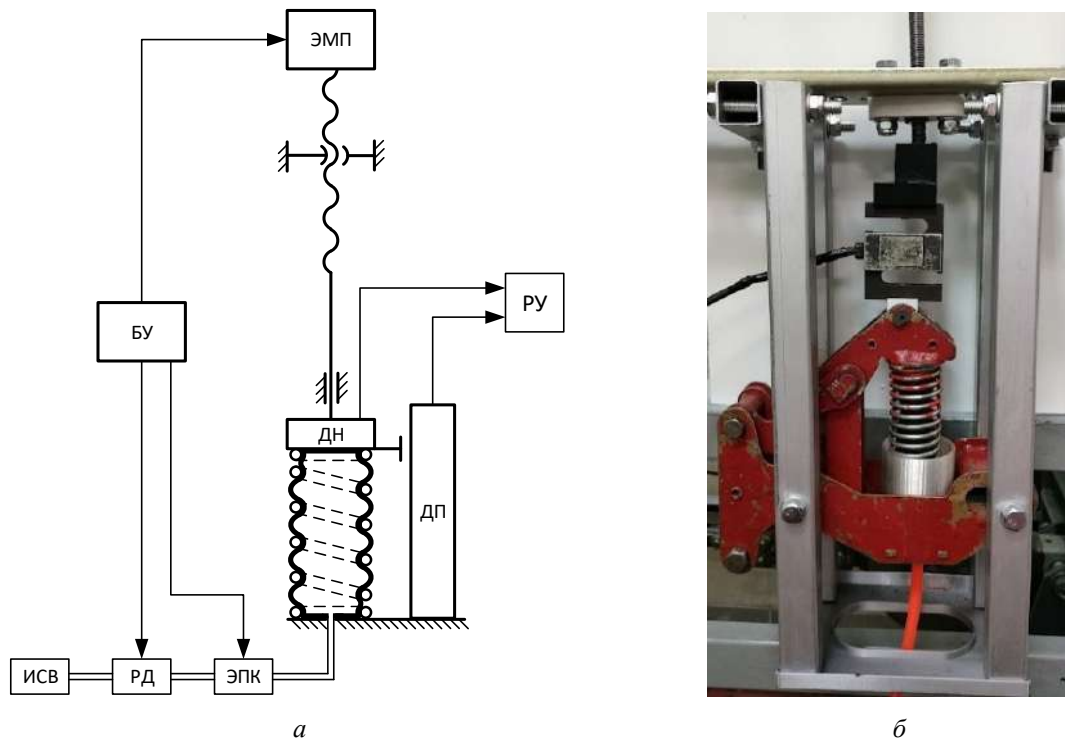


Рисунок 7 – Структурная схема (а) и общий вид (б) стенда для исследования статической характеристики внутрипружинных пневмоэлементов

Воздух подается в полость внутрипружинного пневмоэлемента от источника сжатого воздуха через регулятор давления и электропневматический клапан, включение которого осуществляется блоком управления. Давление регулируется с помощью регулятора давления, который управляется с помощью блока управления. Сжатие внутрипружинного пневмоэлемента осуществляется с помощью винтовой передачи, приводимой в движение с помощью электромеханического привода. Привод обеспечивает постоянную скорость сжатия, поскольку неравномерность скорости сжатия и возможные паузы оказывают значительное влияние на силы трения, что может привести к получению искаженных статических характеристик.

Для регистрации силы, создаваемой пневмоэлементом, используется S-образный тензометрический датчик. Вертикальные перемещения регистрируются с помощью датчика перемещения. Информация от датчиков поступает в регистрирующее устройство и впоследствии обрабатывается с помощью ЭВМ для получения параметров внутрипружинных пневмоэлементов, необходимых для их описания с помощью выражения (4).

На рисунке 8 приведены статические характеристики внутрипружинного пневмоэлемента с толщиной оболочки 1 мм при давлении внутри его полости 0, 100 и 150 кПа.

Для реализации разработанной математической модели использован программный комплекс MATLAB Simulink, позволяющий осуществлять моделирование взаимодействия токоприемника, оснащенного САР статического нажатия и статической характеристики катетки, и контактной подвески. На рисунке 9 приведена имитационная модель, выполненная в MATLAB Simulink. Основными блоками, входящими в разработанную модель, являются блок имитации контактной подвески (Catenary), блок имитации контакта (Contact), блок имитации токоприемника (Pantograph), блок имитации подъемного резинокордного элемента (LPA), контур управления статического нажатия (LPA ACS) и контур управления статической характеристикой катетки (ISPA ACS).

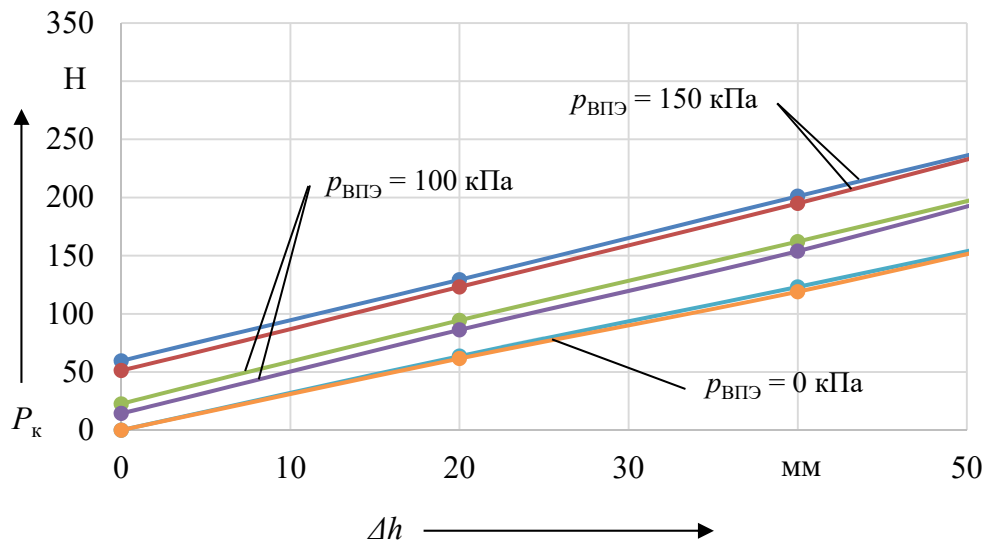


Рисунок 8 – Статическая характеристика внутрипружинного пневмоэлемента

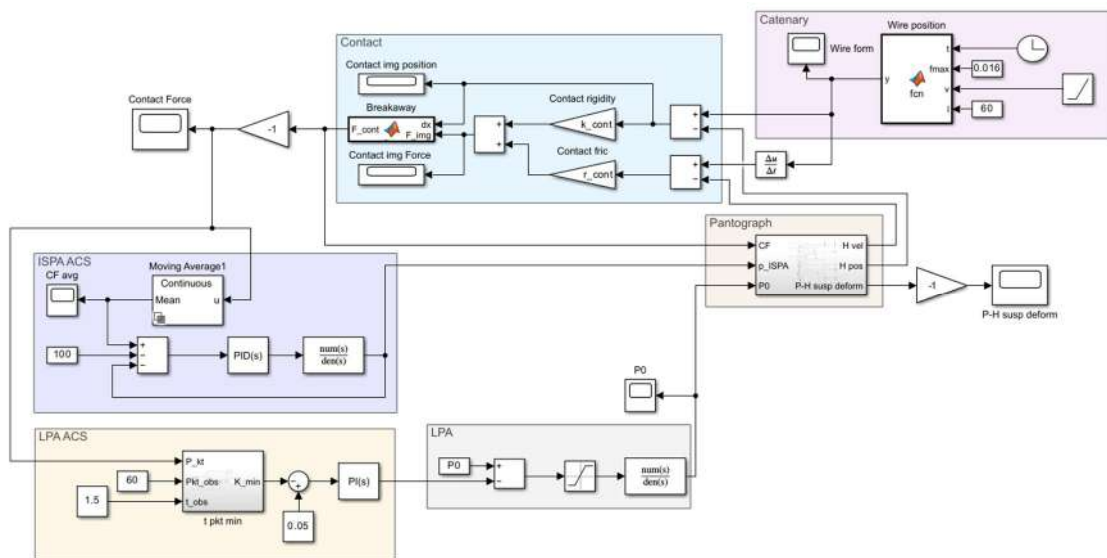


Рисунок 9 – Имитационная модель, выполненная в программном комплексе MATLAB Simulink

На рисунке 10 представлены кривые изменения контактного нажатия токоприемников, полученные в результате моделирования в MATLAB Simulink при имитации взаимодействия токоприемника и контактной подвески при движении электроподвижного состава. В процессе моделирования контактная подвеска с длиной пролета 60 м и стрелой провеса 1,5 см была представлена в виде жесткой синусоиды. Скорость движения электроподвижного состава увеличивалась от 10 до 70 м/с. Снижение контактного нажатия ниже уровня $P_{кт\ min} = 40$ Н существенно увеличивает риск возникновения искрения и отрывов и поэтому принимается как нарушение процесса токосъема.

На рисунке 10, а представлена кривая изменения контактного нажатия токоприемника, не оборудованного системой автоматического регулирования статического нажатия и статической характеристики каретки. При скорости свыше 60 м/с контактное нажатие снижается до 40 Н, что значительно увеличивает риск возникновения искрения и электроэрозионного износа контактных вставок и контактного провода.

Применение только САР статического нажатия (рисунок 10, б) уменьшает риск возникновения отрывов и искрения за счет повышения статического нажатия токоприемника.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Однако при дальнейшем увеличении скорости возникают «пробой» пружин каретки, что сопровождается резким ростом контактного нажатия. Это происходит из-за избыточного сжатия пружин кареток, вызванного увеличением статического нажатия токоприемника для предотвращения падения контактного нажатия ниже уровня $P_{кт\ min}$. Кроме того, «пробой» могут вызвать отрывы, нарушая работу кареток.

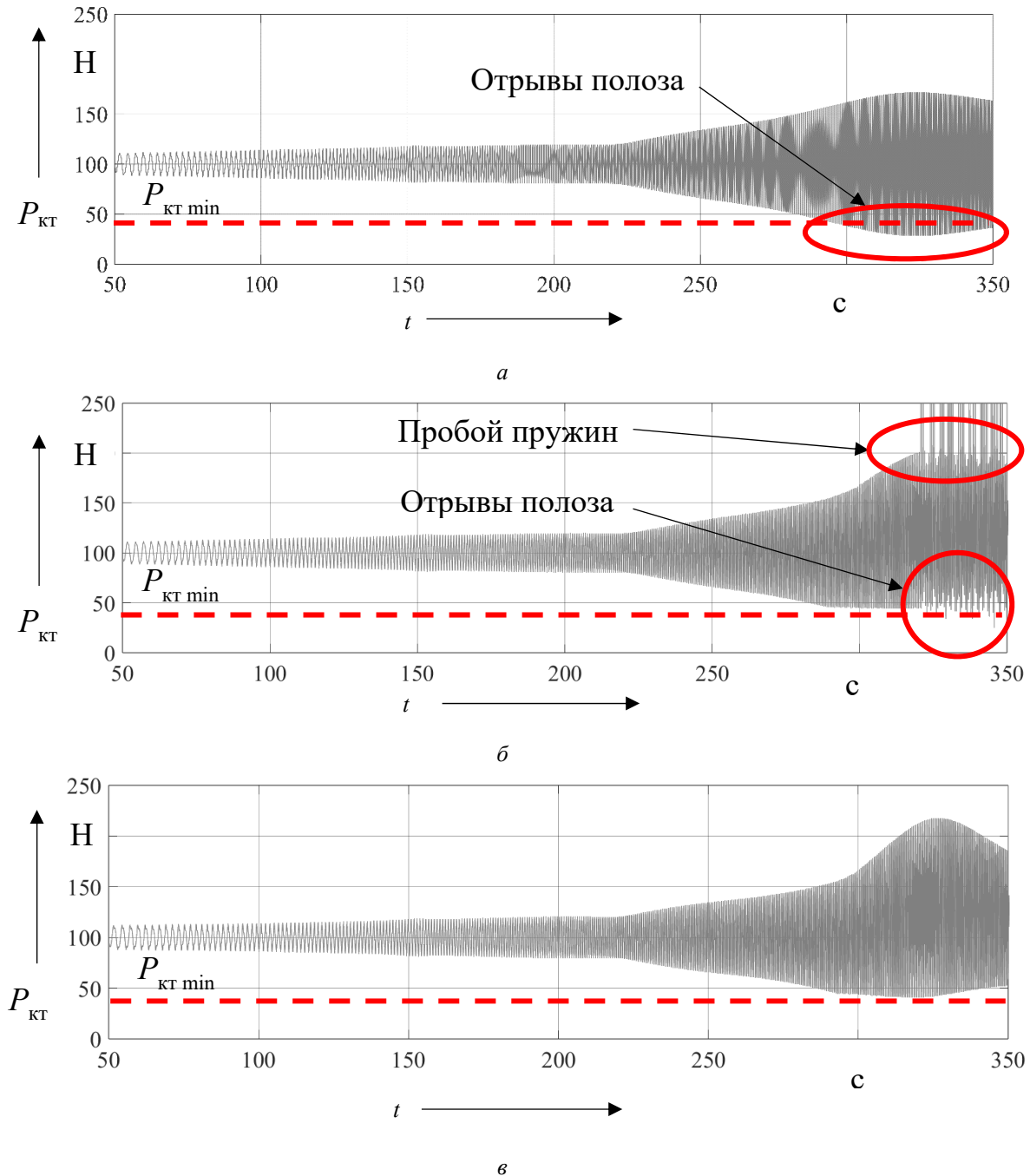


Рисунок 10 – Кривые изменения контактного нажатия, полученные в результате моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески при движении электроподвижного состава: *а* – без САР; *б* – САР статического нажатия; *в* – САР статического нажатия и статической характеристики кареток

Одновременное использование САР статического нажатия и статической характеристики кареток (рисунок 10, *в*) позволяет избежать отрывов и стабилизировать сжатие упругих элементов кареток. Одновременно с увеличением давления в подъемном пневмоэлементе, приводящим к росту силы статического нажатия, статическая характеристика каретки регулируется так, чтобы среднее сжатие внутрипружинного пневмоэлемента было близким к

50 % от его предельного сжатия, что позволяет избежать «пробой» упругих элементов кареток. Это обеспечивает надежный токосъем и предотвращает возникновение отрывов и искрения.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложена конструкция каретки токоприемника, оснащенной управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами с регулируемой статической характеристикой.

2. Разработана трехмассовая математическая модель токоприемника, оснащенного внутрипружинными элементами в каретке, которая реализована в среде MATLAB Simulink.

3. Разработана методика экспериментального определения статической характеристики каретки, оснащенной управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами.

4. Результаты расчетов кривых изменения контактного нажатия токоприемника показали, что применение ПИ-регулятора позволяет повысить качество токосъема за счет снижения вероятности отрывов полоза от контактного провода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-10188.

Список литературы

1. Allotta B., Pugi L., Bartolini F. Design and Experimental Results of an Active Suspension System for a High-Speed Pantograph. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, no. 13 (5), pp. 548-557.

2. Голубков, А. С. Определение оптимального среднего контактного нажатия токоприемника в системе токосъема с помощью алгоритмов машинного обучения / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, С. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск, 18–19 октября 2018 г. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 231–236.

3. Сидоров, О. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 5. – С. 511–517.

4. Сидоров, О. А. Совершенствование систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения / О. А. Сидоров, В. Н. Горюнов, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 108–113. – DOI 10.25206/2310-9793-2017-5-3-108-113.

5. Ko M., Yokoyama M., Yamashita Y., Kobayashi S., Usuda T. Contact force control of an active pantograph for high speed trains. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, no. 744, pp. 012151.

6. Разработка кареток токоприемников электроподвижного состава, оснащенных управляемыми упругими элементами / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 3. – С. 16–21. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-3-16-21.

7. Патент № 212297 Российская Федерация, МПК В60L 5/08. Каретка токоприемника электроподвижного состава : № 2022114479 : заявлено 27.05.2022 : опубликовано 14.07.2022 / Сидоров О. А., Михайлов М. С. – Текст : непосредственный.

8. Патент № 2780681 Российская Федерация, МПК В60L 5/26, В60L 5/32, G01L 5/04, G01M 17/08. Измерительный токоприемник электроподвижного состава : № 2022114488 : заявлено 27.05.2022 : опубликовано 29.09.2022 / Сидоров О. А., Михайлов М. С., Чертков И. Е. – Текст : непосредственный.

9. Abdullah M., Michitsuji Y., Nagai M., Venture G. System Identification of Railway Trains Pantograph for Active Pantograph Simulation. *Journal of System Design and Dynamics*, 2011, no. 5, pp. 1141-1154.

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

References

1. Allotta B., Pugi L., Bartolini F. Design and Experimental Results of an Active Suspension System for a High-Speed Pantograph. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, no. 13 (5), pp. 548-557.

2. Golubkov A.S., Ermachkov G.R., Smerdin S.N. [Determination of the optimal average contact pressure of the pantograph in the current collection system using machine learning algorithms] : *Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte : Materialy III vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem*. [Instruments and methods of measurement, quality control and diagnostics in industry and transport: materials of the III all-Russian scientific and technical conference with international participation]. Omsk, 2018, pp. 231-236 (In Russian).

3. Sidorov O.A., Philippov V.M., Stupakov S.A. Studies of the electromechanical wear of contact pairs in the current collection devices of electric transports. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, no. 5, pp. 390-394, DOI 10.3103/S1068366615050128.

4. Sidorov O.A., Goriunov V.N., Golubkov A.S. Improvement of automatic control systems of current collectors for high speeds. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin – Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 2017, vol. 5, no. 3. pp. 108-113, DOI 10.25206/2310-9793-2017-5-3-108-113.

5. Ko M., Yokoyama M., Yamashita Y., Kobayashi S., Usuda T. Contact force control of an active pantograph for high speed trains. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, no. 744, pp. 012151.

6. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Mikhailov M.S., Philippov V.M. Developing electric rolling stock pantographs head suspension equipped with controlled elastic elements. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2023, vol. 66, no. 3, pp. 16-21, DOI 10.17213/0136-3360-2023-3-16-21 (In Russian).

7. Sidorov O.A., Mikhailov M.S. *Patent RU 212297 U1*, 14.07.2022.

8. Sidorov O. A., Mikhailov M. S., Chertkov I. E. *Patent RU 2780681 C1*, 29.09.2022.

9. Abdullah M., Michitsuji Y., Nagai M., Venture G. System Identification of Railway Trains Pantograph for Active Pantograph Simulation. *Journal of System Design and Dynamics*, 2011, no. 5. pp. 1141-1154.

10. Grigorev B.S., Golovin O.A., Viktorov E.D., Kudryashov E.V. Mathematical modeling of the mechanical interaction of pantographs and overhead contact line for high-speed electrified railways. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta – Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University*, 2012, no. 4 (159), pp. 155-162.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоров Олег Алексеевич

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) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sidorov Oleg Aseksseovich

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) 31-34-46.

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Михайлов Михаил Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (999) 459-19-52.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Mikhailov Mikhail Sergeevich

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 (999) 459-19-52.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Исследование токоприемников электроподвижного состава, оснащенных внутри-пружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 10 – 22.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorov O.A., Mikhailov M.S. Research of electric rolling stock pantographs equipped with intra-spring pneumatic elements in the panhead suspension. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 10-22 (In Russian).

УДК 621.332:3(07)

А. А. Косяков¹, Ю. А. Кочунов²

¹Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация;

²Общество с ограниченной ответственностью «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ», г. Екатеринбург, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КРОНШТЕЙНОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6 – 10 кВ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. На железнодорожном транспорте одним из потребителей I категории по надежности является воздушная линия сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), в качестве резерва используется линия продольного электроснабжения (ПЭ). Электропитание СЦБ и ПЭ осуществляется по проводам воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением 6 – 10 кВ. ВЛ располагаются как на отдельно стоящих опорах, так и на опорах контактной сети с полевой стороны опоры. В качестве поддерживающих конструкций применяются металлические или деревянные траверсы и кронштейны с изоляторами. Одной из причин выхода из строя ВЛ является перекрытие изоляторов из-за индуктивных и грозовых перенапряжений. С целью повышения надежности предлагается в качестве поддерживающих конструкций использовать кронштейны, выполненные из полимерных композитных материалов (ПКМ). Данные конструкции выполнены из изоляционного материала и не требуют применения дополнительных изоляторов. Их электрическая прочность в несколько раз больше, чем у традиционных фарфоровых и стеклянных изоляторов, применяемых на ВЛ 6 – 10 кВ. В связи с этим появился вопрос о принципах работы кронштейнов из ПКМ при возникновении перенапряжений.

В работе рассмотрены принципы возникновения перенапряжений, представлены отечественные устройства защиты ВЛ от перенапряжений, их характеристики. Рассмотрена работоспособность кронштейнов, выполненных из полимерных композитных материалов, при возникновении импульсного перенапряжения и прямого удара молнии в воздушную линию электропередачи напряжением 6 – 10 кВ устройств СЦБ и продольного электроснабжения железных дорог.

Актуальность работы обусловлена новизной объекта техники – полимерного композитного кронштейна линий электропередачи: в современной нормативной документации особенности эксплуатации изоляции такого вида электротехнического оборудования почти не рассматриваются.

Исследование полимерных композитных кронштейнов выполнено опытным способом в лаборатории техники высоких напряжений Уральского государственного университета путей сообщения с использованием генератора импульсных напряжений. Результатом работы стали выводы по увеличению надежности воздушной линии СЦБ и ПЭ при эксплуатации кронштейнов, выполненных из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: прямой удар молнии, импульсное напряжение, разряд, защитное устройство, полимерный композитный материал, кронштейн.

Aleksey A. Kosyakow¹, Yuriy A. Kochunow²

¹Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, the Russian Federation;
²«NPP «ELEKTROMASH» company, Ekaterinburg, the Russian Federation

CHARACTERISTICS FOR POLYCOMPOSITE BRACKETS 6 – 10 kV FOR DIRECT ELECTRIC SUPPLY OF RAILWAYS

Abstract. In railway transport, one of the consumers of category I in terms of reliability is the overhead signaling, centralization and interlocking (SCB) line; the non-traction power supply line is used as a reserve. The power supply of the signaling and control devices is carried out through the wires of an overhead power line (OHL) with a voltage of 6 – 10 kV. Overhead lines are located both on free-standing supports and on contact network supports, on the field side of the line. Metal or wooden traverses and brackets with insulators are used as supporting structures. One of the reasons for the failure of overhead lines is the overlap of insulators due to inductive and lightning overvoltages. In order to increase reliability, it is proposed to use brackets made of polymer composite materials (PCM) as supporting structures. These structures are made of insulating material and do not require the use of additional insulators. Their electrical strength is several times greater than that of traditional porcelain and glass insulators used on 6 – 10 kV overhead lines. In this regard, the question arose about the principles of operation of PCM brackets in the event of overvoltages.

The work depicts the principles of the occurrence of overvoltages, presents Russian made devices for protecting overhead lines from overvoltages, and their characteristics. The performance of brackets made of polymer composite materials is considered in the event of a impulse overvoltages and a direct lightning strikes into an overhead power line with a voltage of 6 – 10 kV for signaling devices and non-traction power supply railway lines.

The relevance of the work is due to the novelty of the technical object – the polymer composite bracket for power lines: in modern regulatory documentation, the operating features of the insulation of this type of electrical equipment are almost not considered.

The study of polymer composite brackets was carried out experimentally in high voltage laboratory of the Ural State University of Transport with use of a pulse voltage generator. The result of the work are conclusions on increasing the reliability of the SCB and non-traction power supply lines with use of brackets made of polymer composite materials.

Keywords: bracket, direct lightning strike, discharge, protective device, surge voltage.

В электросетевом комплексе России большую протяженность имеют воздушные линии (ВЛ) напряжением 6 – 10 кВ. В последние годы особое внимание уделяется защите ВЛ от импульсных перенапряжений (ИП) и прямых ударов молнии (ПУМов), последствия которых приводят к невозможности пробоя или перекрытию изоляции, повреждению оболочки самонесущих изолированных проводов (СИПов), а далее – к перерыву питания потребителей и дополнительным расходам на восстановительные работы. Литературный обзор показал, что эта проблема актуальна во всем мире [1 – 9].

Защита от перенапряжений основана на нескольких принципах:

- 1) ограничение числа режимов, в которых могут возникнуть опасные перенапряжения, за счет использования схемных мероприятий;
- 2) ограничение амплитуд установившихся перенапряжений, что приводит к снижению перенапряжений в переходных режимах;
- 3) ограничение с помощью аппаратных средств.

Под аппаратным средством понимается устройство, устанавливаемое рядом с защищаемым оборудованием, и при возникновении перенапряжения это устройство шунтирует защищаемый объект. В качестве таких аппаратов могут использоваться разрядники, ограничители перенапряжения и гибридные цепи.

Принцип действия защитного аппарата состоит в том, что он предотвращает появление на электроустановке импульсов перенапряжения, опасных для ее изоляции, и не препятствует работе электроустановки при рабочем напряжении.

Для предупреждения перенапряжений на защищаемом объекте и его повреждения вольт-секундная характеристика защитного аппарата (рисунок 1, кривая 1) должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемого объекта (кривая 2). Если это требование выполняется, то появление опасных перенапряжений невозможно, так как при набегании импульсов напряжения (кривая 3) происходит пробой защитного аппарата со срезом

напряжения в точке А. Если аппарат защиты отсутствует, то произойдет пробой изоляции объекта в точке Б. Вслед за импульсным током через защитный аппарат протекает сопровождающий ток, а на защитном аппарате появляется остаточное напряжение $U_{ост}$. При работе защитного аппарата необходимо погасить сопровождающий ток в первый переход через ноль, иначе может произойти отключение установки защитой. В соответствии с этим можно сформулировать требования, предъявляемые к аппарату защиты: вольт-секундная характеристика защитного аппарата должна быть ниже, чем у защищаемого объекта; защитный аппарат должен иметь определенную гарантированную электрическую прочность; остаточное напряжение на защитном аппарате, характеризующее его ограничивающую способность, не должно превышать значений, опасных для изоляции оборудования; сопровождающий ток должен отключаться за время, меньшее, чем время срабатывания защиты; защитный аппарат должен допускать большое количество срабатываний без осмотра и ремонта и быть безопасным для окружающего оборудования.

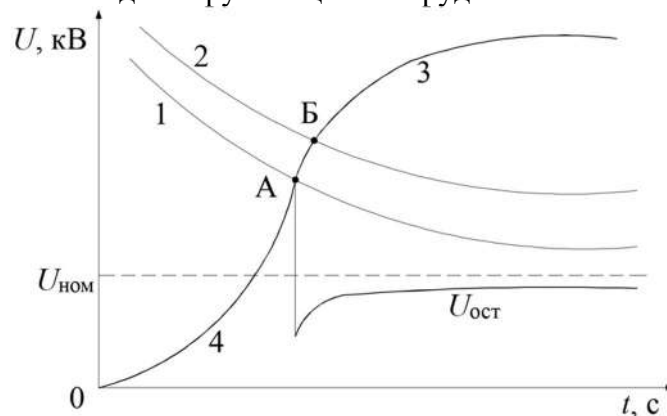


Рисунок 1 – Принцип действия защитного аппарата: 1 – характеристика защитного аппарата; 2 – характеристика защищаемого объекта; 3 – волна перенапряжения; 4 – срезанная волна перенапряжения; U – испытательное напряжение, кВ; $U_{ном}$ – номинальное напряжение электроустановки, кВ; $U_{ост}$ – остаточное напряжение на электроустановке после срабатывания защитного аппарата, кВ; t – время, с

Как уже было отмечено, одним из видов защиты от перенапряжения является использование на ВЛ разрядников: трубчатых, вентильных, длинноискровых и мультикамерных. В источниках [10 – 12] достаточно подробно рассмотрены принципы работы разрядников, способы их крепления, методы защиты. Но необходимо отметить, что в любом случае происходит пробой искрового промежутка между токоведущей и заземленной частями защищаемого объекта.

На ВЛ нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта разрядники устанавливаются по одному на траверсе с чередованием фаз – по такому же принципу, как и ЛЭП 6 – 10 кВ электросетевого комплекса ПАО «Россети» [10].

Однако стоит заметить, что воздушные линии 6 – 10 кВ, питающие устройства сигнализации, централизации, блокировки железной дороги и линии продольного электроснабжения нетяговых потребителей, могут располагаться на опорах контактной сети на кронштейнах.

В настоящее время кронштейны изготавливаются из металла, дерева и полимерных композитных материалов. Причем деревянные кронштейны и кронштейны из ПКМ являются диэлектриками и не имеют по всей поверхности заземленной части, к которой можно было бы присоединить разрядник. В связи с этим нужно решить задачу о защите ВЛ 6 – 10 кВ с использованием изоляционных поддерживающих конструкций.

Кронштейны ВЛ СЦБ и ПЭ крепятся на опоре контактной сети к общему заземлителю, т. е. все устройства заземлены на одну точку. Рассмотрим использование металлического кронштейна с изоляторами группового троса заземления (рисунок 2).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

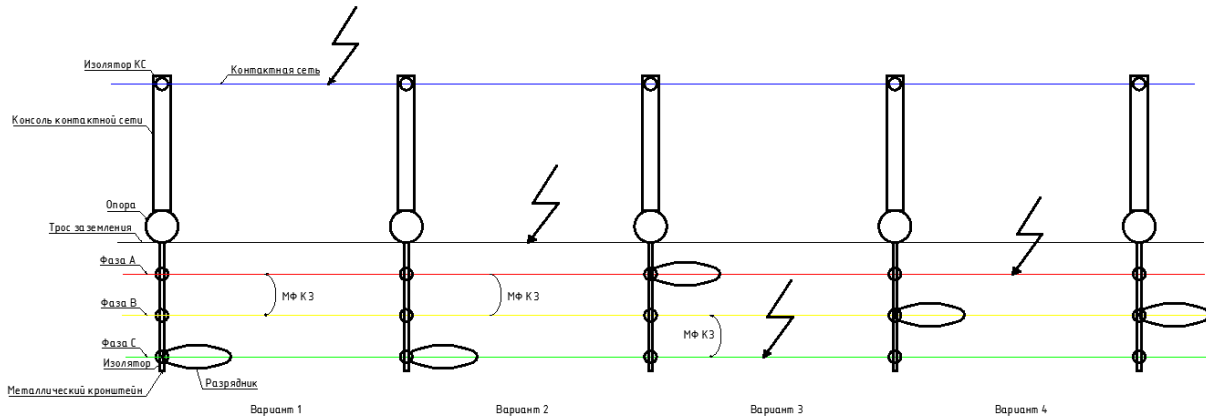


Рисунок 2 – Варианты перекрытия изоляции воздушной линии с использованием разрядников на металлических кронштейнах ВЛ СЦБ и ПЭ

В данном случае чередование разрядников по фазам неэффективно, что объясняется такими факторами:

- 1) прямой удар молнии в контактную сеть. При этом возможны перекрытия изоляции контактной сети и перемещение разряда на кронштейн. Так как разрядник находится на дальней фазе, на фазах А и В может образоваться междуфазное короткое замыкание (МФ КЗ);
- 2) протекание разряда по тросу заземления будет аналогично ПУМу в контактную сеть;
- 3) ПУМ в фазе С при установке разрядника в фазе А может вызвать МФ КЗ на фазах С и В;
- 4) при ПУМе в фазе А или С возможен пробой изоляции, но при этом не возникнет МФ КЗ, так как на фазе В установлен разрядник.

Такое положение подтверждается применением устройства защиты от атмосферных перенапряжений (УЗД), представленном на рисунке 3. Принцип работы подобных УЗД основан на создании МФ КЗ и отключения линии, что нежелательно для устройств СЦБ, при этом защита изоляторов от пробоя не обеспечивается [13].

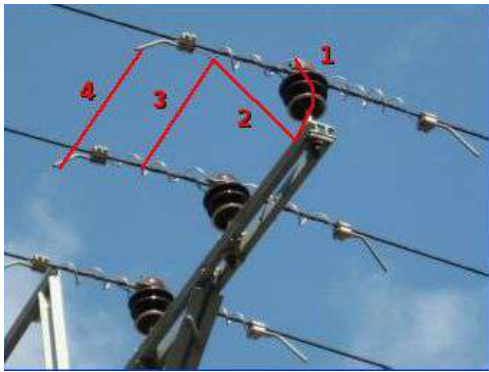


Рисунок 3 – Устройство УЗД (<https://mzva.ru>):

- 1 – перекрытие изолятора; 2 – перемещение силовой дуги; 3 – переброс дуги на соседнюю фазу;
- 4 – междуфазное короткое замыкание

устройства крепится к стержню или серьге изолятора со стороны земли, разрядный элемент вплотную или через воздушный промежуток соединяется с проводом. Разрядники с мультикамерной системой (МКС) представлены на рисунке 4 [10].

Мультикамерные разрядники эффективнее, чем РДИПы, так как работают с большими токами, поэтому их применение на ВЛ СЦБ и ПЭ является предпочтительным. Технические характеристики этих разрядников приведены в таблице 1.

Из изложенного следует, что установка разрядников с чередованием фаз неэффективно защищает ВЛ СЦБ от перенапряжений, так как линия может отключиться от МФ КЗ. Использование разрядников на каждой фазе невыгодно экономически. Поэтому оптимальным вариантом для воздушной линии устройств СЦБ и ПЭ, расположенной на опорах контактной сети железных дорог, является применение одного разрядника на центральной фазе и использование транспозиции. Что

касается металлических кронштейнов с подвесными или штыревыми изоляторами, принцип установки разрядников подробно описан производителями. Один конец

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



а



б

Рисунок 4 – Разрядники РМКЭ-20-IV-UХЛ1 и РМК-20-IV-UХЛ1 системы МКС [10]

Таблица 1 – Технические характеристики разрядников системы МКС

Тип разрядника	РМКЭ	РМК
Класс напряжения, кВ	6 – 10	
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ	7,2 – 12	
Искровой промежуток, мм	60 – 80	40 – 60
Импульсное разрядное напряжение кВ, не более	120	100
Одноминутное переменное напряжение, кВ, не менее:		
в сухом состоянии	40	30
под дождем	30	20
Величина ожидаемого тока КЗ сети, при котором гарантируется не менее 10 срабатываний, кА, не более	3,5	0,6 – 3
Выдерживаемый импульсный ток длительностью до полуспада не менее 50 мкс, не менее двух воздействий, кА	20	30
Время гашения дуги сопровождающего тока, мс, не более	10	–
Пропускная способность, Кл	2,4	–
Масса, кг	3,7	0,9

Одно из перспективных направлений по повышению надежности ВЛ СЦБ и ПЭ связано с применением кронштейнов, выполненных из полимерных композитных материалов. Такие кронштейны представляют собой изоляционно-поддерживающую конструкцию, обеспечивающую механическую и электрическую прочность линии. В качестве примера на рисунке 5 изображен полимерный кронштейн КПСИП-3-п БОРЭЛ производства ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» [14], в таблице 2 приведены его технические параметры.

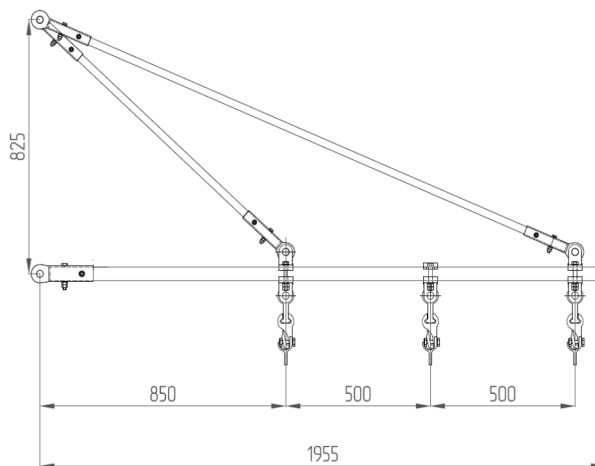


Рисунок 5 – Полимерный кронштейн КПСИП-3-п БОРЭЛ [14]

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Таблица 2 – Технические характеристики кронштейна КПСИП-3-п

Параметр	Нормативное значение
Прогиб, мм, не более	13
Сопротивление изоляции, не менее, Ом	10^{13}
Длина пути утечки тока, мм	500
Кратковременное напряжение в сухом состоянии, кВ	65
Кратковременное напряжение под дождем, кВ	45
Выдерживаемое напряжение в загрязненном и увлажненном состоянии, 50 %-ное напряжение, кВ	23
Трекинг-эрозионная стойкость при 15 кВ, ч	500
Выдерживаемое импульсное напряжение с крутым фронтом, кВ	250
Адгезия защитной оболочки, баллов	1
Масса, не более, кг	25

Из данных таблицы 2 видно, что разрядные показатели кронштейна достаточно высокие (250 кВ), однако напряжение при разряде молнии может быть гораздо больше.

Рассмотрим работу ВЛ с использованием кронштейнов, выполненных из ПКМ (рисунок 6). Допустим, что ПУМ произошел на дальней от опоры фазе (вариант 3), преодолеть разряду всю длину изоляционного стержня до заземленной части достаточно трудно, поэтому перенапряжение может возникнуть на соседней фазе и вызовет МФ КЗ, в результате произойдет нежелательное отключение питания устройств СЦБ.

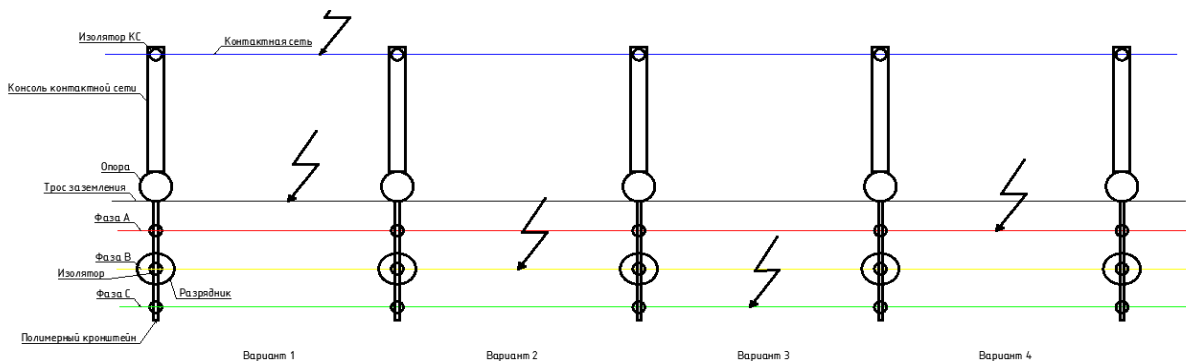


Рисунок 6 – Работа защиты при применении разрядника на полимерном кронштейне со стеклянным изолятором в центральной фазе

С точки зрения повышения надежности ВЛ в центральную фазу кронштейна предложено включить разрядник системы МКС с изолятором, однако данный вариант требует дополнительной проработки и анализа. В такой комбинации изолятор является дополнительной защитой фазного провода от перенапряжения. При этом возможно использование как стеклянных, так и полимерных подвесных изоляторов (рисунок 7).

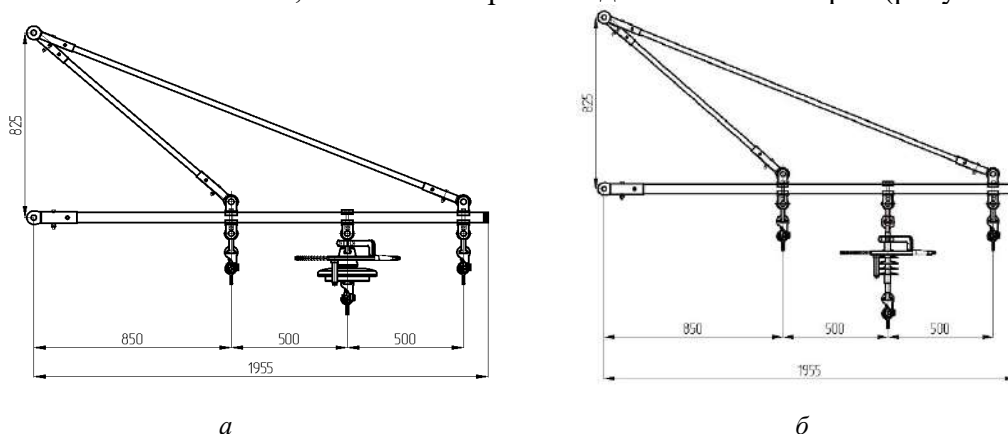


Рисунок 7 – Полимерный кронштейн КПСИП-3 БОРЭЛ с разрядником РМКЭ-20 в исполнении со стеклянным (а) и полимерным (б) изоляторами

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для подтверждения или опровержения эффективности использования одного разрядника в средней фазе линии электропередачи 6 – 10 кВ были проведены испытания разрядных характеристик системы «разрядник – полимерный кронштейн».

Опытные испытания проводились в апреле 2021 г. в лаборатории «Техника высоких напряжений» (ТВН) Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС) с использованием четырехступенчатого генератора импульсных напряжений. Импульсные напряжения подавались на образец кронштейна с мультикамерным разрядником РМКЭ-20 (рисунок 8).

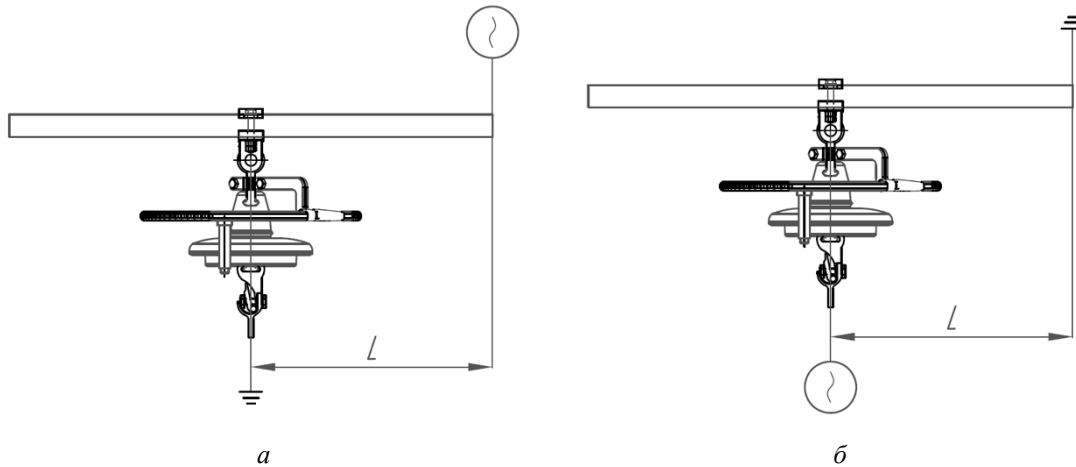


Рисунок 8 – Схемы проведения испытаний: подача напряжения на стержень (а) и на провод (б),
 L – длина изоляционной части образца

Испытания показали следующее (таблица 3):

1) при монтаже разрядника на полимерном кронштейне разрядные напряжения системы «разрядник – полимерный кронштейн» на 10 – 40 % превышают паспортные значения разрядных напряжений разрядника, смонтированного на заземленном металлическом кронштейне;

2) непосредственно полимерный кронштейн не защищает от перенапряжений соседние провода – при попадании молнии в провод разряд проходит на соседний провод, пробой проходит по воздуху, а не по телу изолирующей конструкции (кронштейну);

3) разрядник работает только при наличии заземления.

Таблица 3 – Результаты испытаний разрядных характеристик системы «разрядник – полимерный кронштейн»

Изоляционное расстояние стержня L , мм	Испытание с изолятором, подача напряжения на стержень $U_{\text{имп}}$, кВ	Испытание без изолятора, подача напряжения на стержень $U_{\text{имп}}$, кВ	Испытание без изолятора, подача напряжения на провод $U_{\text{имп}}$, кВ
0	130	–	–
70	167	–	–
90	166	–	–
100	167	145	–
200	–	175	205

По результатам проведенных испытаний определено, что на полимерном кронштейне использование разрядников без их заземленной части неэффективно – необходимы разработка и применение других разрядных конструкций. Например, в грозоактивных районах и в районах с повышенной степенью загрязнения следует использовать комбинированную изоляцию (рисунок 9) с применением ограничителей перенапряжений (ОПН) (рисунок 10).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

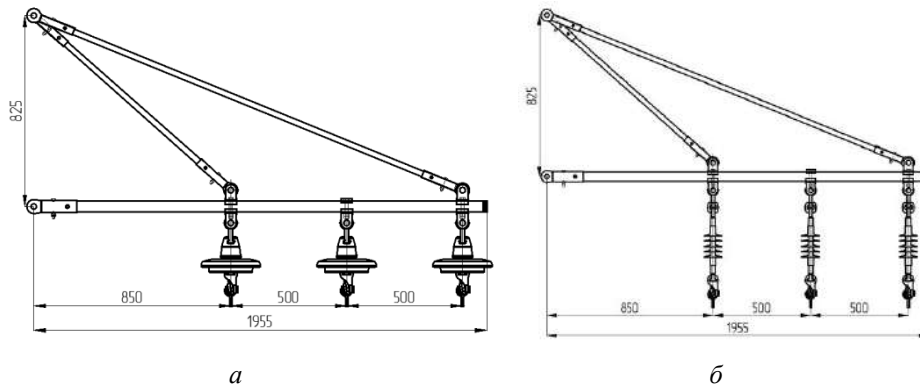


Рисунок 9 – Полимерный кронштейн КПСИП-3 БОРЭЛ
в исполнении со стеклянным (а) и полимерным (б) изоляторами

Полимерные кронштейны с ОПН на ВЛ СЦБ и ПЭ можно выполнять аналогично деревянному кронштейну с трубчатыми разрядниками (рисунок 10).

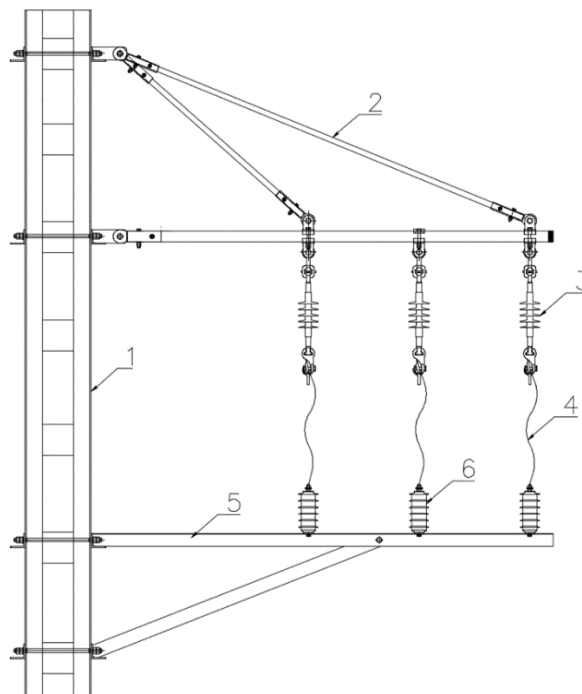


Рисунок 10 – Схема защиты ВЛ СЦБ и ПЭ с применением полимерных кронштейнов и ОПН:
1 – опора; 2 – полимерный кронштейн; 3 – полимерный изолятор; 4 – соединительный шлейф;
5 – металлический кронштейн; 6 – ОПН

Размещение защитных аппаратов на ВЛ СЦБ и ПЭ осуществляется в соответствии с российскими государственными стандартами и стандартами предприятий электрических сетей.

На основании проведенных экспериментов и анализа возможных схем включения разрядников, полимерных кронштейнов и изоляторов определено, что установка разрядников на ВЛ СЦБ и ПЭ с чередованием по фазам недостаточно эффективна из-за возможных междофазных коротких замыканий. Применение полимерных кронштейнов на ВЛ СЦБ и ПЭ повышает электрическую прочность воздушной линии, особенно в сочетании с изоляторами, но не защищает ВЛ от прямых ударов молнии и импульсного перенапряжения. На полимерных кронштейнах допускается применять разрядники только при их заземлении, т. е. при работе с разнопотенциальными частями ВЛ. Повысить надежность воздушной линии можно при помощи комбинированной изоляции (полимерный кронштейн и полимерные изоляторы) с применением ОПН.

Список литературы

1. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. *Erlangen : Publicis Publishing*, 2018, 994 p.
2. Лукьянов, А. М. Полимерные изоляторы для устройств контактной сети / А. М. Лукьянов, Ю. Г. Чепелев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2016. – № 5 (66). – С. 56–70.
3. Каталог продукции Powerlines Group GmbH // powerlines-products.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: [http://www.powerlines-products.com/spl/spl_products.nsf/sysPages/produktkatalog_de.html/\\$file/Powerlines%20Products%20Catalogue%202018%20Online.pdf](http://www.powerlines-products.com/spl/spl_products.nsf/sysPages/produktkatalog_de.html/$file/Powerlines%20Products%20Catalogue%202018%20Online.pdf) (дата обращения: 12.06.2023).
4. Zielenkiewicz M., Maksimowicz T. Lightning Protection Zones Created by Traction Construction of Railways. *XXIII International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 2015, pp. 81-84.
5. Theethayi N., Liu Y., Montano R., Thottappillil R. A theoretical study on the consequence of a direct lightning strike to electrified railway system in Sweden. *Electric Power Systems Research*, 2005, no. 2 (74), pp. 267-280.
6. Dev P. Lightning Protection Analysis of Light Rail Transit DC Overhead Contact System. *2005 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. Saratoga Springs, New York, 2005.
7. Ono Y., Nomura T., Fujita H., Arai H. Estimation of Lightning Overvoltage in Signalling Equipment of Electrified Railways. *Quarterly Report of RTRI*, 2017, no. 4 (58), pp. 292-297.
8. 3 Products to Consider for Railway Lightning Protection // blog.nvent.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://blog.nvent.com/erico-3-products-to-consider-for-railway-lightning-protection/> (дата обращения: 12.06.2023).
9. Solutions for Railways & Transportation Surge Protection Devices and Voltage Limiting Devices // lsp-international.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.lsp-international.com/solutions-for-railways-transportation-surge-protection-devices-and-voltage-limiting-devices/> (дата обращения: 12.06.2023).
10. АО «НПО «Стример» // streamer.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://streamer.ru/streamer_products/lightning-protection/induced-lightning/rdip-10-iv-uh11/ (дата обращения: 12.06.2023).
11. Подпоркин, Г. В. Современная грозозащита распределительных воздушных линий 6, 10 кВ длинно-искровыми разрядниками / Г. В. Подпоркин, А. Д. Сиваев. – Текст : непосредственный // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 1. – С. 36–42.
12. Калакутский, Е. С. Разработка и исследование длинно-искровых и мультикамерных разрядников для молниезащиты воздушных линий электропередачи 6 – 220 кВ : специальность 05.14.12 «Техника высоких напряжений» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калакутский Евгений Сергеевич ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2013. – 197 с. – Текст : непосредственный.
13. Защита высоковольтных линий от грозовых перенапряжений // myslide.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://myslide.ru/presentation/skachat-zashhita-vysokovoltnyx-linij-ot-grozovyx-perenapryazhenij> (дата обращения: 12.06.2023).
14. НПП «ЭЛЕКТРОМАШ». Публикации о полимерных кронштейнах // nppem.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://nppem.ru/page-5.html> (дата обращения: 12.06.2023).

References

1. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. *Erlangen : Publicis Publishing*, 2018, 994 p.

2. Luk'janov A.M., Chepelev Ju.G. Polymer insulators for contact network. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2016, no. 5 (66), pp. 56-70 (In Russian).
3. *Katalog produkcii Powerlines Group GmbH* [Production catalogue Powerlines Group GmbH]. Available at: [http://www.powerlines-products.com/spl/spl_products.nsf/sysPages/produktkatalog_de.html/\\$file/Powerlines%20Products%20Catalogue%202018%20Online.pdf](http://www.powerlines-products.com/spl/spl_products.nsf/sysPages/produktkatalog_de.html/$file/Powerlines%20Products%20Catalogue%202018%20Online.pdf) (accessed 12.06.2023).
4. Zielenkiewicz M., Maksimowicz T. Lightning Protection Zones Created by Traction Construction of Railways. *XXIII International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 2015, pp. 81-84.
5. Theethayi N., Liu Y., Montano R., Thottappillil R. A theoretical study on the consequence of a direct lightning strike to electrified railway system in Sweden. *Electric Power Systems Research*, 2005, no. 2 (74), pp. 267-280.
6. Dev P. Lightning Protection Analysis of Light Rail Transit DC Overhead Contact System. *2005 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*. Saratoga Springs, New York, 2005.
7. Ono Y., Nomura T., Fujita H., Arai H. Estimation of Lightning Overvoltage in Signalling Equipment of Electrified Railways. *Quarterly Report of RTRI*, 2017, no. 4 (58), pp. 292-297.
8. 3 Products to Consider for Railway Lightning Protection. Available at: <https://blog.nvent.com/erico-3-products-to-consider-for-railway-lightning-protection/> (accessed 12.06.2023).
9. Solutions for Railways & Transportation Surge Protection Devices and Voltage Limiting Devices. Available at: <https://www.lsp-international.com/solutions-for-railways-transportation-surge-protection-devices-and-voltage-limiting-devices/> (accessed 12.06.2023).
10. *АО «НПО «Strimer»* [JSC «NPO «Streamer»]. Available at: http://streamer.ru/streamer_products/lightning-protection/induced-lightning/rdip-10-iv-uhl1/ (accessed 12.06.2023).
11. Podporkin G.V., Sivaev A.D. Modern lightning protection of 6, 10 kV power lines with long-spark arresters. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaja promyshlennost' – Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, 2006, no. 1, pp. 36-42 (In Russian).
12. Kalakutskij E.S. *Razrabotka i issledovanie dlinno-iskrovyyh i mul'tikamernyyh razrjadnikov dlja molniezashhity vozdushnyh linij jelektroperedachi 6-220 kV* (Development and research of long-spark and multi-chamber arresters for lightning protection of power lines 6-220 kV). Doctor's thesis, Saint-Petersburg, SPTU, 2013, 197 p. (In Russian).
13. *Zashhita vysokovol'tnyh linij ot grozovyh perenapryazhenij* [High voltage lines protection from lightning overvoltages]. Available at: <https://myslide.ru/presentation/skachat-zashhita-vysokovoltnyx-linij-ot-grozovyx-perenapryazhenij> (accessed 12.06.2023).
14. *NPP «JeLEKTROMASH»*. *Publikacii o polimernyyh kronshtejnah* [NPP «ELEKTROMASH» Polymer brackets publications]. Available at: <http://nppem.ru/page-5.html> (accessed 12.06.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Косяков Алексей Александрович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины», УрГУПС.

Тел.: +7 (912) 677-82-33.

E-mail: kosakov@yandex.ru

Кочунов Юрий Александрович

ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

1-й Пятилетки пл., 1, г. Екатеринбург, 620012, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, инженер-конструктор ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kosyakov Aleksey Aleksandrowich

Ural State University of Railway Transport (USURT).

66, Kolmogorow st., Ekaterinburg, 620034, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric machines», USURT.

Phone: +7 (912) 677-82-33.

E-mail: kosakov@yandex.ru

Kochunow Yuriy Aleksandrowich

«NPP «ELEKTROMASH» company.

1, 1-st Piatiletki sq., Ekaterinburg, 620012, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, engineer-designer of «NPP «ELEKTROMASH» company.

Тел.: +7 (906) 862-73-75.
E-mail: yukochunov@mail.ru

Phone: +7 (906) 862-73-75.
E-mail: yukochunov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Косяков, А. А. Определение разрядных характеристик полимерных композитных кронштейнов воздушных линий 6 – 10 кВ устройств автоматизации и продольного электроснабжения железных дорог / А. А. Косяков, Ю. А. Кочунов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 22 – 32.

Kosyakow A. A., Kochunow Yu. A. Characteristics for polycomposite brackets 6 – 10 kV for direct electric supply of railways. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 22-32 (In Russian).

УДК 621.311

В. Л. Незевак

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы регулирования напряжения в системе тягового электроснабжения постоянного тока при помощи устройств накопления электроэнергии. Целью работы являются разработка и апробация алгоритма регулирования системы накопления электроэнергии, предназначенного для управления преобразователями. В работе предложены функциональная схема управления с регулированием по уровню напряжения, структурная схема межподстанционной зоны с размещением системы накопления электроэнергии на посту секционирования контактной сети и алгоритм регулирования. Апробация алгоритма регулирования устройств накопления электроэнергии выполнена в программной среде Matlab с помощью пакета Simscape на основе разработанной модели межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения постоянного тока, содержащей переменную тяговую нагрузку, при принятых допущениях. Имитационное моделирование позволяет определить основные параметры, показатели работы системы накопления электроэнергии и качество регулирования напряжения на шинах поста секционирования при изменении электротяговой нагрузки в границах межподстанционной зоны. Полученные результаты позволяют перейти к отработке алгоритмов регулирования устройств накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока на основе способов, которые учитывают работу регулируемых устройств (автоматического регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока на основе управляемых реакторов, регулирования напряжения силовых понижающих и преобразовательных трансформаторов, резервирования мощности, вольтодобавочные устройства, статические компенсаторы и генераторы реактивной мощности, устройства продольной компенсации реактивной мощности и др.). Полученные результаты позволяют перейти к разработке инновационных систем тягового электроснабжения на основе высокоавтоматизированных (цифровых) тяговых подстанций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, научный проект № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, постоянный ток, регулирование по уровню напряжения, система накопления электроэнергии, функциональная схема регулирования, алгоритм работы, имитационная модель.

Vladislav L. Nezevak

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

MODELING OF VOLTAGE REGULATION PROCESSES IN DC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS WITH THE HELP OF ELECTRICITY STORAGE DEVICES

Abstract. The article discusses the issues of voltage regulation in the DC traction power supply system using electric power storage devices. The aim of the work is to develop and test an algorithm for regulating an electric power storage system designed to control converters. The paper proposes a functional control scheme with voltage regulation, a block

diagram of an inter-substation zone with the placement of an electric power storage system at the contact network partitioning station and a control algorithm. The approbation of the algorithm for regulating power storage devices was performed in the Matlab software environment using the Simscape package based on the developed model of the inter-substation zone of a DC traction power supply system containing a variable traction load, under accepted assumptions. Simulation modeling allows us to determine the main parameters, performance indicators of the power storage system and the quality of voltage regulation on the tines of the sectioning station when the electric traction load changes within the boundaries of the substation zone. The results obtained allow us to proceed to the development of algorithms for regulating electric power storage devices in DC and AC traction power supply systems based on methods that take into account the operation of regulated devices (automatic voltage regulation on the tines of DC traction substations based on controlled reactors, voltage regulation of power step-down transformers, power redundancy, voltage-boosting devices, static compensators and reactive power generators capacities, devices for longitudinal compensation of reactive power, etc.). The results obtained make it possible to proceed to the development of innovative traction power supply systems based on highly automated (digital) traction substations.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, scientific project No. 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

Keywords: traction power supply system, direct current, voltage regulation, power storage system, functional control scheme, operation algorithm, simulation model.

В основе создания интеллектуальных систем тягового электроснабжения лежат технологии, позволяющие регулировать режимы работы оборудования с помощью адаптивных алгоритмов и искусственного интеллекта. Регулирование осуществляется как с помощью коммутационного оборудования, так и с помощью систем управления режимами работы силового оборудования и параметрами регулируемых устройств, резервирования питания и др. [1 – 3]. К основному оборудованию, режимы работы которого регулируются [4, 5], относятся силовые понижающие и преобразовательные трансформаторы (управление уровнем напряжения, подключение резерва), вольтодобавочные устройства, статические генераторы и компенсаторы реактивной мощности, системы накопления электроэнергии и др. Управление указанными устройствами требует разработки подходов и совершенствования эффективности алгоритмов регулирования. Разработка и апробация алгоритма регулирования устройств накопления электроэнергии, предназначенных для управления преобразователями в системах тягового электроснабжения, являются целью настоящего исследования.

Разработка основных подходов к применению систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) на железнодорожном транспорте определяется основными направлениями развития и технологическими ориентирами, закрепленными в «Энергетической стратегии» и «Долгосрочной программе развития» ОАО «РЖД» [6]. Целью применения СНЭЭ в ОАО «РЖД» является повышение эффективности основных технологических и производственных процессов. Достижение указанной цели выполняется путем решения ряда задач на основе технологий приема, хранения и отдачи электроэнергии.

В настоящее время разработан ряд технических решений по построению СНЭЭ в электроэнергетических системах, в том числе в системах электроснабжения железнодорожного транспорта. Как показывают исследования, применение СНЭЭ неуправляемого типа в электроэнергетических системах и системах электроснабжения транспорта нецелесообразно по ряду причин, связанных с необходимостью преобразования уровня напряжения, рода тока, с регулированием напряжения и мощности и др. Современные СНЭЭ, применяемые в электроэнергетических системах, содержат выпрямительно-инверторные преобразователи и согласующие трансформаторы, мощность и энергоемкость которых достигает мегаваттного диапазона. Изложенные выше аспекты построения интеллектуальных систем электроснабжения железнодорожного транспорта, технологических ориентиров и алгоритмов регулирования подтверждают актуальность задач по регулированию режимов работы устройств в системах тягового электроснабжения, в том числе СНЭЭ.

Построение СНЭЭ осуществляется на основе выбранного накопителя электроэнергии, для которого известны номинальные параметры: номинальное напряжение, номинальная мощность, коэффициент мощности нагрузки, номинальный ток в режимах заряда и разряда, номинальная энергоемкость, допустимая глубина разряда, зарядная и разрядная характерис-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

тики, коэффициент полезного действия, скорость отклика, удельные показатели мощности и энергии и др.

Выбранная топология СНЭЭ в зависимости от решаемых задач и требований со стороны электрической сети может быть пассивной, полуактивной или активной. Ввиду того, что уровень напряжения накопителей электроэнергии в ряде случаев не совпадает с уровнем напряжения электрической сети и регулирование режимов работы выполняется с помощью преобразователей, структура СНЭЭ приобретает вид, приведенный на рисунке 1.

СНЭЭ содержит три подсистемы, выполняющие

основную функцию по приему, возврату и хранению энергии (блок накопления, преобразователи DC/AC и AC/DC, преобразовательный трансформатор);

функции защиты, регулирования и связи (блоки защиты и автоматики, регулирования, приема и передачи информации, интерфейс связи);

функции обеспечения собственных нужд (система собственных нужд и вспомогательная система).

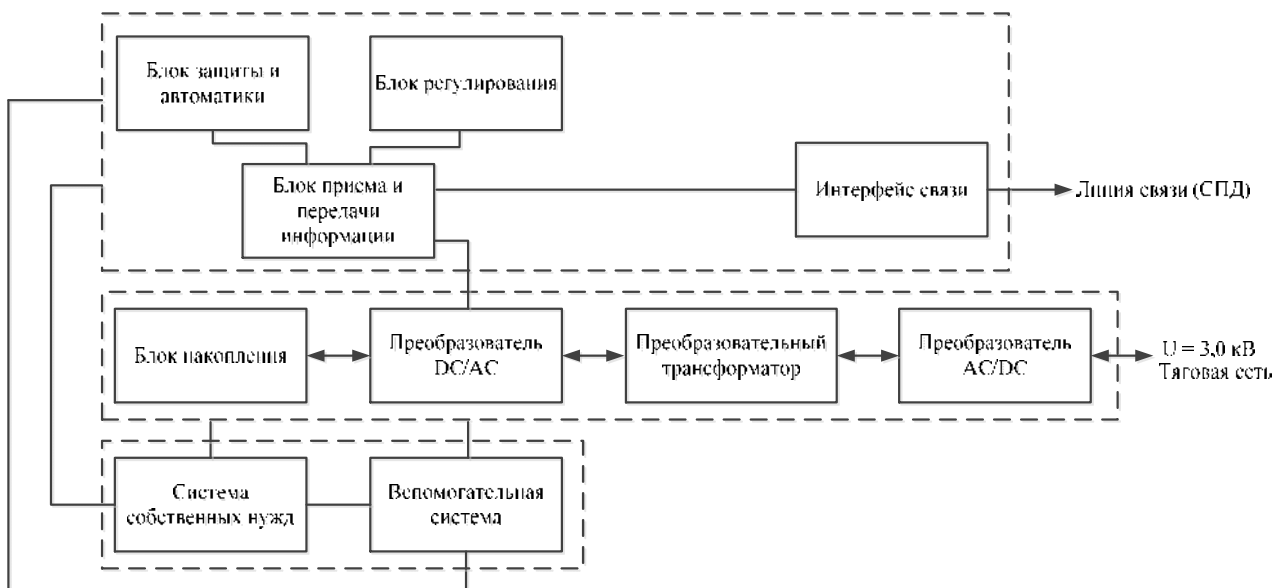


Рисунок 1 – Структурная схема системы накопления электроэнергии

Управление режимами работы и регулирование мощности СНЭЭ выполняется по уровню напряжения на шинах, к которым подключена СНЭЭ;

по уровню потребляемой нагрузки в границах межподстанционной зоны (МПЗ) с учетом режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ), внешних характеристик смежных тяговых подстанций и других факторов.

Регулирование мощности СНЭЭ выполняется с учетом следующих параметров:

- скорости изменения напряжения и тяговой нагрузки;
- уровня степени заряженности и глубины разряда;
- максимального тока в режиме заряда и разряда;
- деградации емкости.

При построении преобразователей СНЭЭ коэффициент полезного действия достигает уровня около 95 %, а коэффициент гармонических искажений напряжения и тока не превышает 2 % [7]. Современные преобразователи выполняются на основе IGBT-модулей, управление которыми осуществляется на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с частотой в диапазоне от 500 до 5000 Гц.

Оценка различных аспектов работы СНЭЭ может проводиться на основе математических и физических моделей, а результаты моделирования могут использоваться при построении

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

промышленных образцов. С целью отработки алгоритмов регулирования ниже рассматривается работа СНЭЭ в границах межподстанционных зон, содержащих переменную электротяговую нагрузку.

Наиболее распространены типовые узловые двухсторонние режимы питания межподстанционных зон одно- и двухпутных участков, схема замещения для одной из которых приведена на рисунке 2.

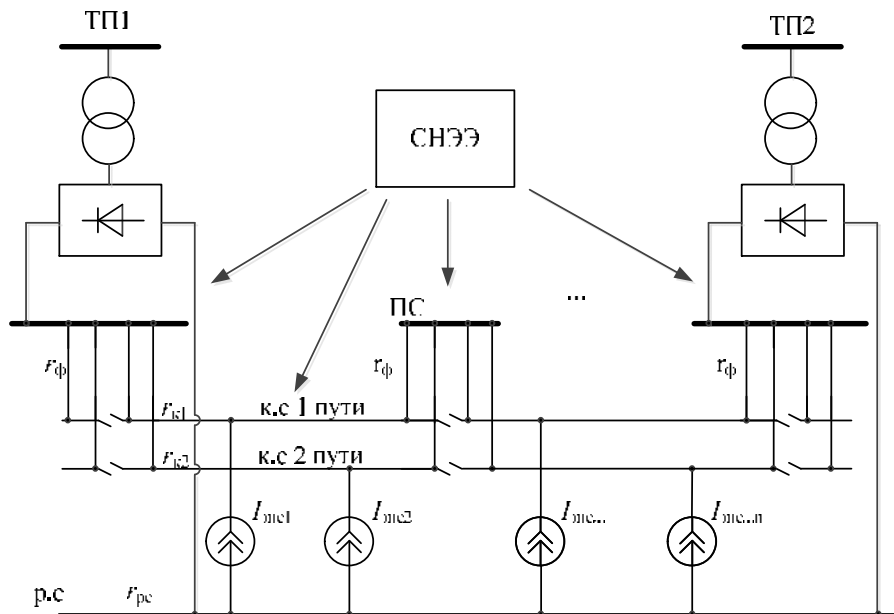


Рисунок 2 – Схема питания межподстанционной зоны

В границах межподстанционной зоны между тяговыми подстанциями ТП1 и ТП2 располагается пост секционирования ПС, позволяющий реализовать узловой режим питания. Контактная и рельсовая сети характеризуются соответствующими удельными сопротивлениями $r_{\text{к}}$, $r_{\text{к}}$ и $r_{\text{р.с}}$. Электроподвижной состав представлен в виде тяговой нагрузки $I_{\text{тс}}$. Присоединение СНЭЭ в зависимости от решаемых задач выполняется на тяговых подстанциях, линейных устройствах или контактной сети.

Размещение СНЭЭ в СТЭ определяется стоящими перед ними задачами и в общем случае ограничено кругом тяговых подстанций и линейных устройств. При решении задачи повышения пропускной и провозной способности при их ограничении по уровню напряжения на токоприемнике электроподвижного состава СНЭЭ размещаются на линейных устройствах. При решении задачи повышения нагрузочной способности силового оборудования (снижение перегрузки) СНЭЭ могут размещаться как на тяговых подстанциях, так и на линейных устройствах.

Регулирование по уровню напряжения в контактной сети является наиболее распространенным способом регулирования работы устройств в системах тягового электроснабжения постоянного тока. К регулируемым устройствам в системах тягового электроснабжения постоянного тока помимо СНЭЭ относятся инверторы и управляемые выпрямители тяговых подстанций, устройства регулирования напряжения с помощью управляемых реакторов на тяговых подстанциях (устройства бесконтактного автоматического регулирования напряжения), вольтодобавочные устройства, пункты преобразования напряжения и др.

Принципы работы перечисленных выше устройств основаны:

на регулировании угла открытия тиристоры в схемах инверторов и управляемых выпрямителей;

регулировании тока подмагничивания управляемых реакторов для изменения коэффициента трансформации преобразовательных трансформаторов;

управляемом подключении дополнительного преобразовательного агрегата в цепь основного преобразовательного агрегата тяговой подстанции;

регулировании продолжительности открытого состояния запираемых тиристорov в схемах преобразования напряжения на линейных устройствах (постах секционирования).

Исходя из структурных схем построения СНЭЭ регулирование по уровню напряжения осуществляется несколькими способами с учетом топологии устройств:

при пассивной топологии регулирование осуществляется путем соответствующего подключения или отключения СНЭЭ от шин постоянного тока. В подключенном состоянии работа устройства не регулируется, а определяется соответствующими характеристиками и параметрами. Отключенное состояние соответствует режиму ожидания;

при полуактивной или активной топологии регулирование осуществляется с помощью двунаправленных преобразователей, позволяющих регулировать уровень напряжения и тока на основе ШИМ с помощью силовых транзисторов или запираемых тиристорov.

Применение управляемых преобразователей позволяет регулировать уровень напряжения на выходе СНЭЭ в зависимости от напряжения на шинах линейных устройств или тяговых подстанций. Принцип регулирования по уровню напряжения основан на задании опорного напряжения, при отклонении от которого изменяется регулирующее воздействие на преобразователь. Системы автоматического регулирования позволяют реализовать астатическую характеристику, где уровень напряжения не зависит от нагрузки, и статическую, для которой уровень напряжения зависит от нагрузки.

Для астатической характеристики напряжение на выходе преобразователя поддерживается постоянным:

$$U_d = U_{d0} = \text{const.} \quad (1)$$

Статическая характеристика для регулируемого устройства определяется статизмом (углом наклона прямой внешней характеристики):

$$U_d = U_{d0} - k_s I, \quad (2)$$

где k_s – коэффициент статизма;

I – ток СНЭЭ (положительное значение – режим разряда, отрицательное – режим заряда).

Известны комбинированные характеристики, в которых постоянное значение напряжения соответствует некоторым диапазонам нагрузки, для остальных диапазонов реализуется статическая характеристика. Указанные характеристики реализуются для управляемых выпрямителей и реакторов на тяговых подстанциях, имеющих особенности ограничения диапазонов регулирования напряжения вследствие схемных и конструктивных особенностей устройств.

При регулировании СНЭЭ по уровню напряжения в соответствии с теорией автоматического управления следует применять регулирование системы таким образом, чтобы это соответствовало цели управления.

Задача управления режимами работы СНЭЭ относится к задачам со множеством переменных, например, как это показано в работах [8, 9]. При решении задачи регулирования напряжения и суммарной нагрузки в границах межподстанционной зоны при помощи СНЭЭ управляющие воздействия (x_i) определяются уровнем напряжения на шинах поста секционирования $U_{пс}$ (тяговой подстанции $U_{тп}$) и нагрузкой электроподвижного состава, измеряемой на посту секционирования $I_{пс}$ (тяговой подстанции $I_{тп}$). Возмущающие воздействия (z_i) определяются отклонением напряжения ΔU от напряжения стабилизации (опорного напряжения U_{ref}) и уровнем $I_{тп}$ и изменением тяговой нагрузки подстанций $\Delta I_{тп}$. Регулируемыми переменными (y_i) являются напряжение на выходе СНЭЭ $U_{вых}$ и ток $I_{вых}$, определяемые для режимов заряда и разряда. Промежуточными переменными (u_i) являются

показатели работы СНЭЭ, к которым относятся степень заряженности SoC , глубина разряда DoD , температура t модулей, наработка модулей n (количество циклов работы) и др.

Решение задачи выравнивания графика нагрузки тяговых подстанций связано с регулированием тока нагрузки СНЭЭ в зависимости от тока нагрузки электроподвижного состава и тяговых подстанций. С ростом тока нагрузки электроподвижного состава увеличивается и ток СНЭЭ для соответствующих режимов. Управляющие воздействия (x_i) определяются уровнем тяговой нагрузки на тяговых подстанциях $I_{ТП}$. Возмущающие воздействия (z_i) являются отклонением тяговой нагрузки $\Delta I_{ТП}$ в соответствующей части межподстанционной зоны. Регулируемыми переменными (y_i), как и в предыдущей задаче, являются напряжение на выходе СНЭЭ $U_{ВЫХ}$ и ток $I_{ВЫХ}$, определяемые для режимов заряда и разряда. Промежуточными переменными (u_i) являются внутренние показатели СНЭЭ, к которым относятся степень заряженности SoC , глубина разряда DoD , температура t , наработка n (количество циклов работы) и другие показатели работы.

Функциональная схема управления СНЭЭ с обратной связью, реализующая регулирование по уровню напряжения на шинах поста секционирования с учетом показателей работы накопителя электроэнергии, приведена на рисунке 3.

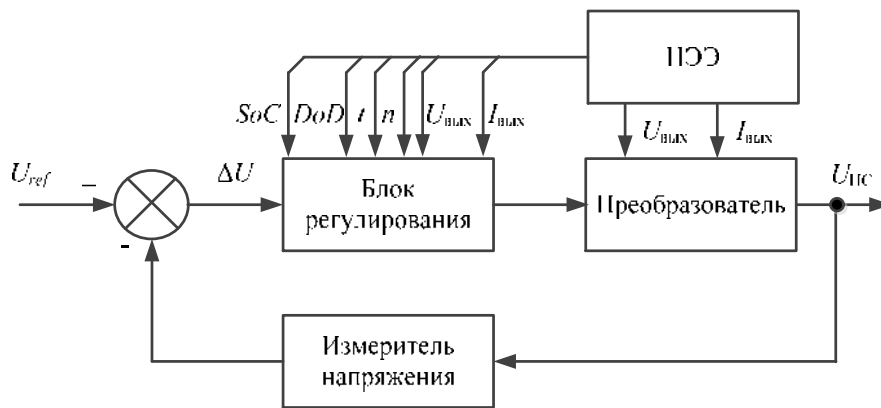


Рисунок 3 – Функциональная схема управления СНЭЭ с регулированием по уровню напряжения

Режимы работы и ток СНЭЭ $I_{ВЫХ}$ определяются уровнем напряжения $U_{ПС}$ на шинах объекта (тяговой подстанции или линейного устройства), к которому подключена система. Порядок смены режимов работы СНЭЭ следующий.

1. Перед включением в работу система диагностики технического состояния СНЭЭ определяет основные показатели НЭЭ (SoC , DoD , n , t , $U_{ВЫХ}$, $I_{ВЫХ}$) и передает их на блок регулирования.

Одновременно с этим на блок регулирования поступает информация об уровне напряжения на шинах устройства (поста секционирования).

На основании поступивших данных о состоянии НЭЭ и уровне напряжения блок регулирования формирует управляющее воздействие на преобразователь.

В случае превышения опорного напряжения U_{ref} с помощью преобразователя выполняется заряд СНЭЭ, при этом уровень тока заряда определяется блоком регулирования таким образом, чтобы при увеличении напряжения происходило соответствующее увеличение уровня тока заряда.

В случае снижения уровня напряжения на шинах ниже опорного напряжения U_{ref} реализуется режим разряда, при этом уровень тока разряда определяется блоком регулирования пропорционально отклонению напряжения от уровня опорного напряжения.

2. При напряжении на шинах устройства, находящемся в диапазоне, близком к напряжению стабилизации U_{ref} , СНЭЭ находится в режиме ожидания, ток СНЭЭ равен нулю.

3. В случае выхода показателей НЭЭ за допустимые пределы СНЭЭ переходит в режим ожидания (в нормальном режиме) или отключается (в аварийном режиме).

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Структурная схема системы тягового электроснабжения постоянного тока с СНЭЭ, регулируемой по уровню напряжения, содержит оборудование измерения и регистрации напряжения, регулирования режимов и характеристик (рисунок 4).

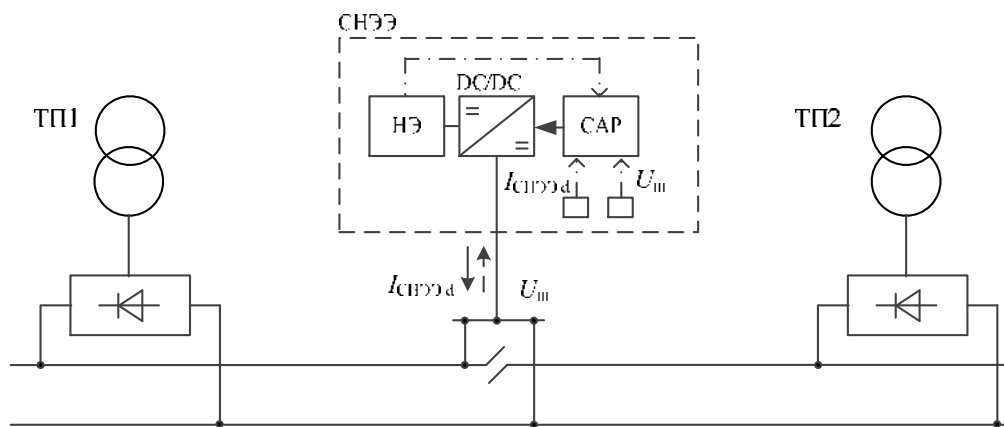


Рисунок 4 – Структурная схема межподстанционной зоны с системой накопления электроэнергии, регулируемой по уровню напряжения

Напряжение на шинах устройства $U_{ш}$ (в частности, поста секционирования $U_{пс}$) (см. рисунок 4) поступает на блок регулирования (САР). На вход САР поступают данные измерений тока $I_{СНЭЭd}$ (ток СНЭЭ $I_{ввых}$) и данные измерений показателей (SoC , DoD , n , t , $U_{ввых}$). С помощью САР выполняется регулирование работы преобразователя DC/DC.

Напряжение в контактной сети зависит от уровня напряжения на шинах тяговой подстанции, тяговой нагрузки и схемы питания и секционирования контактной сети. Качественная характеристика внешней характеристики в зависимости от отклонения уровня напряжения от напряжения стабилизации приведена на рисунке 5.

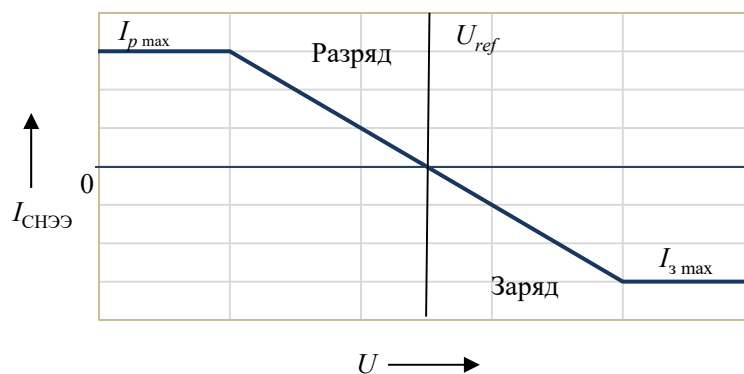


Рисунок 5 – Характеристика системы накопления электроэнергии при регулировании по уровню напряжения

При значении напряжения в контактной сети $U_{ш}$, равном опорному напряжению U_{ref} , ток СНЭЭ $I_{СНЭЭ}$ отсутствует. При падении напряжения в контактной сети ниже U_{ref} ток $I_{СНЭЭ}$ увеличивается для компенсации падения напряжения в контактной сети до максимального уровня $I_{p\ max}$, после которого следует стабилизация по току. Аналогичным образом строится характеристика в режиме заряда, где ток СНЭЭ при росте напряжения увеличивается до максимального уровня $I_{z\ max}$.

Фрагмент алгоритма работы СНЭЭ при регулировании по уровню напряжения приведен на рисунке 6.

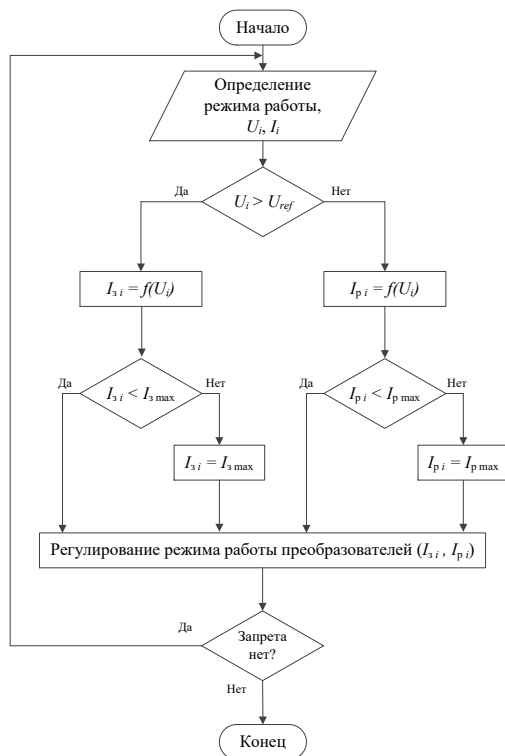


Рисунок 6 – Алгоритм регулирования СНЭЭ по уровню напряжения

В зависимости от уровня напряжения U_i определяется ток для режимов заряда I_{3i} или разряда I_{pi} , ограничиваемый максимальными рабочими токами для соответствующих режимов. В случае неисправности работы СНЭЭ вводится запрет на дальнейшую работу устройства.

Стабилизация уровня напряжения на шинах путем регулирования тока СНЭЭ при определении его уровня по функциональным зависимостям выполняется с учетом уровня и скорости изменения напряжения и тока на каждом шаге регулирования. При регулировании тока в различных режимах работы для защиты силового оборудования учитывается скорость изменения тока и напряжения:

$$I_{з(р)i} = f \left(U_i, \frac{dU_i}{dt}, I_{з(р)i-1}, \frac{dI_{з(р)i}}{dt} \right). \quad (3)$$

Регулирование по уровню напряжения является одним из наиболее простых и распространенных способов стабилизации напряжения в контактной сети и реализуется в автоматическом режиме.

Устройства регулирования как в СТЭ постоянного (например, устройства бесконтактного автоматического регулирования напряжения на тяговых подстанциях с помощью управляемых реакторов), так и переменного (например, устройства компенсации реактивной мощности, позволяющие выполнить плавное регулирование напряжения за счет изменения уровня и характера нагрузки) тока получили широкое распространение на сети железных дорог России. К недостаткам данного регулирования относят отсутствие корректировки характеристики устройств в зависимости от изменения уровня напряжения и тока нагрузки на смежных тяговых подстанциях, а на тяговых подстанциях переменного тока – от уровня реактивной мощности и уравнивающего тока.

Схемы замещения СТЭ для определения энергетических показателей работы строятся на основе источников ЭДС, сопротивлений и источников тока. Первая группа элементов позволяет задать напряжение холостого хода, вторая – задать конфигурацию контактной и рельсовой сетей с учетом размещения электроподвижного состава (ЭПС), третья – задать тяговую нагрузку.

Для отработки алгоритмов регулирования достаточно рассмотреть наиболее простую схему питания межподстанционной зоны, характерной для однопутного участка железной дороги, для которой источник ЭДС располагается на стороне постоянного тока напряжением 3,0 кВ, а контактная и рельсовая сети представлены соответствующими сопротивлениями. Нагрузка ЭПС носит вероятностный характер и для решения обозначенных задач может быть представлена блоками с источниками тока, в которых нагрузка изменяется случайным образом в заданном диапазоне.

СНЭЭ, расположенная на посту секционирования, представляется источником тока, в котором регулирование осуществляется на основе измеренного уровня напряжения на шинах поста секционирования. Для реализации алгоритма в Matlab используется блок функции, который позволяет задать разрядную и зарядную характеристики СНЭЭ (см. рисунок 5). Регулирование источником тока выполняется с помощью блока *fcn* (Matlab Function), содержащего функцию следующего вида:

$$\begin{cases}
 \text{Режим заряда :} \\
 U_i > U_{ref} : \begin{cases} I_{CHЭЭ\ i} < I_{з\ max} \rightarrow I_{CHЭЭ\ i} = -f_з(U_i) + a; \\ I_{CHЭЭ\ i} \geq I_{з\ max} \rightarrow I_{CHЭЭ\ i} = I_{з\ max}. \end{cases} \\
 \text{Режим разряда :} \\
 U_i < U_{ref} : \begin{cases} I_{CHЭЭ\ p\ i} < I_{p\ max} \rightarrow I_{CHЭЭ\ p\ i} = -f_p(U_i) + b; \\ I_{CHЭЭ\ p\ i} \geq I_{p\ max} \rightarrow I_{CHЭЭ\ p\ i} = I_{p\ max}. \end{cases} \\
 \text{Режим ожидания :} \\
 U_i = U_{ref} : I_{CHЭЭ\ i} = 0,
 \end{cases} \quad (4)$$

где $f_з, f_p$ – функции, определяющие ток СНЭЭ в режиме заряда и разряда соответственно; a, b – свободные члены уравнения характеристик СНЭЭ.

Для решения данной задачи предложена имитационная модель в программной среде Matlab, при построении которой для отработки алгоритмов приняты следующие допущения: участок железной дороги является однопутным; нагрузка электроподвижного состава является стационарной, при этом ток нагрузки изменяется случайным образом по равномерному закону распределения в заданном диапазоне; внешние характеристики тяговых подстанций являются естественными; время отклика СНЭЭ соответствует шагу расчетов; СНЭЭ представлена в виде источника тока; при работе устройства не учитываются температурный режим, ресурс, деградация и другие показатели, связанные с режимами работы СНЭЭ. Модель, разработанная для анализа процессов в границах межподстанционной зоны в программной среде Matlab при принятых допущениях, приведена на рисунке 7 и содержит две тяговые подстанции – 1 и 2, объединенные контактной и рельсовой сетями одного пути, пост секционирования и две единицы электроподвижного состава (ЭПС1, 2).

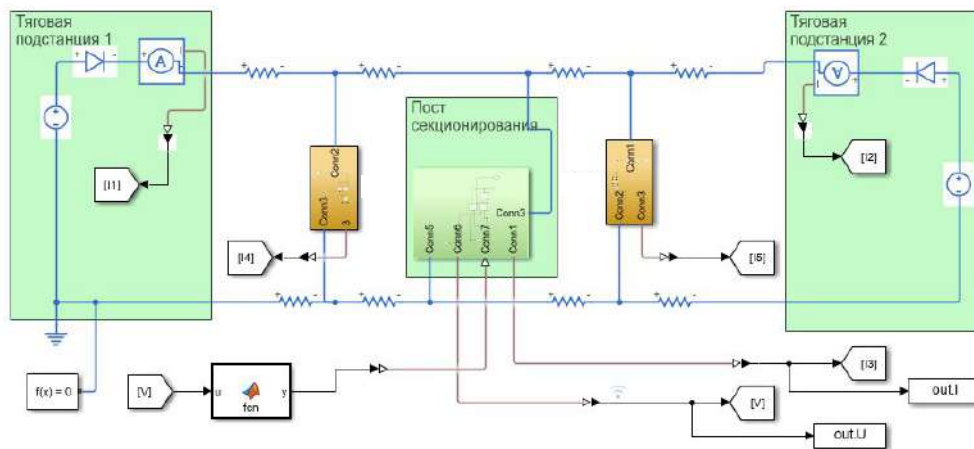


Рисунок 7 – Модель межподстанционной зоны

Моделируется режим двухстороннего питания межподстанционной зоны. Изменение нагрузки электроподвижного состава приводит к изменению напряжения, соответствующему падению напряжения в контактной сети. Регулирование уровня напряжения на шинах поста секционирования контактной сети выполняется на основе измерений уровня напряжения и определения его отклонения от уровня опорного напряжения (напряжения стабилизации).

Разработанная модель позволяет определить ток и мощность СНЭЭ в зависимости от уровня напряжения на посту секционирования, определяемого при изменении тяговой нагрузки. Фрагмент результатов расчета для режима разряда приведен на рисунке 8.

Реализованная характеристика проиллюстрирована для режима разряда СНЭЭ. Регулирование по уровню напряжения позволяет стабилизировать напряжение на уровне

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

опорного (для апробации работы алгоритма регулирования результаты приведены для уровня напряжения 3500 В).

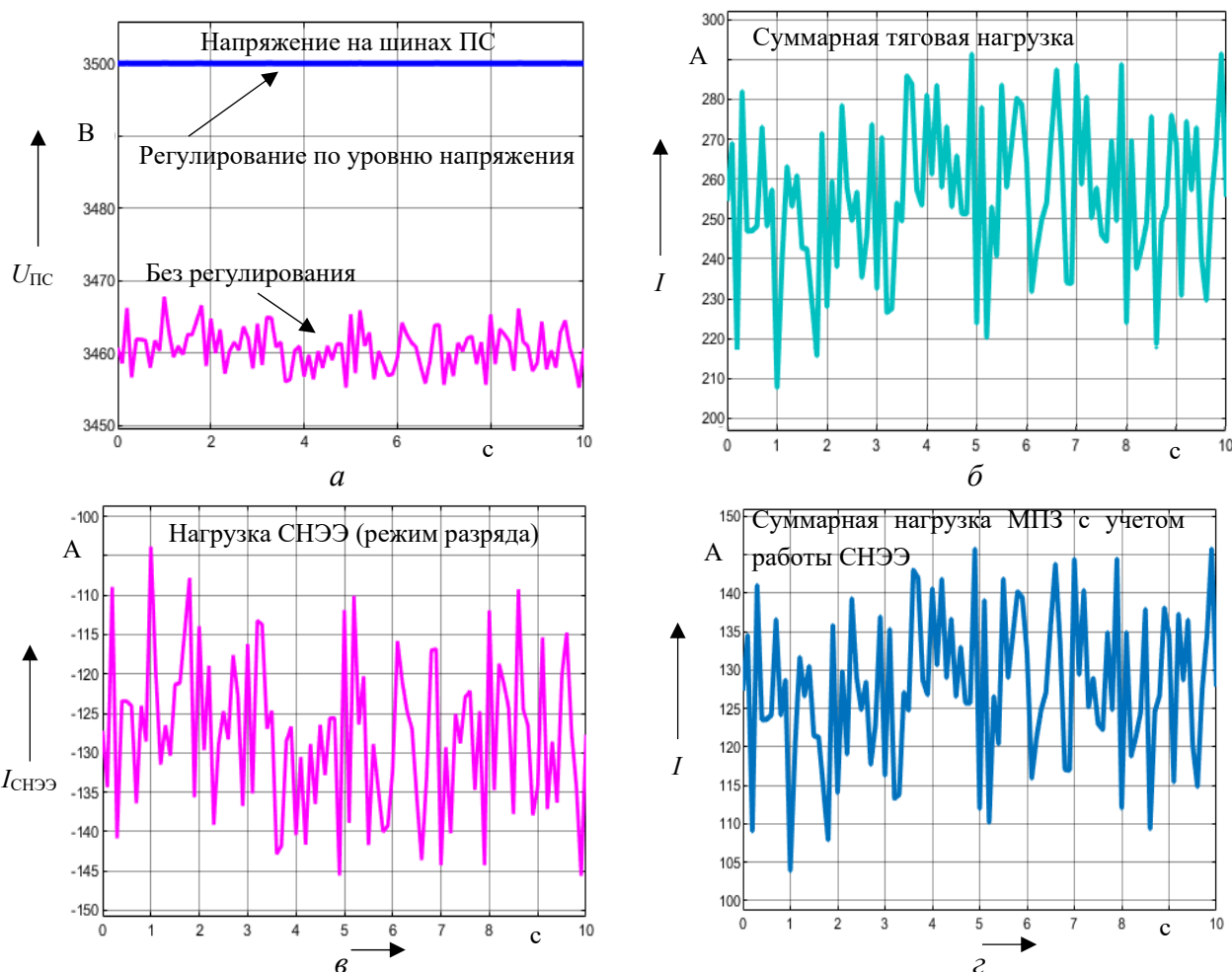


Рисунок 8 – Фрагмент результатов расчета напряжения и тока СНЭЭ: напряжение на шинах (а); суммарная тяговая нагрузка (б); нагрузка СНЭЭ (в); суммарная нагрузка межподстанционной зоны (г)

Выбор коэффициента статизма и функции регулирования определяется уровнем потерь напряжения в контактной сети и ограничениями на уровень мощности и энергоемкости накопителя электроэнергии СНЭЭ.

Возможны следующие режимы напряжения в СТЭ при различных режимах питания и работы системы внешнего электроснабжения:

1) нормальный режим, для которого напряжения холостого хода тяговых подстанций соответствуют рабочим диапазонам.

Указанный режим является наиболее распространенным, продолжительность работы в котором для СТЭ превышает работу в других режимах. Определение параметров СНЭЭ выполняется для указанных режимов с учетом рекуперативного торможения, при котором наблюдается повышение напряжения в контактной сети;

2) режим работы, в котором уровень напряжения холостого хода близок к максимальным рабочим значениям.

Работа СНЭЭ в данном режиме характеризуется увеличением продолжительности режима заряда относительно продолжительности режима разряда и приводит к повышению уровня средней степени заряженности. При увеличении среднего значения напряжения холостого хода на тяговых подстанциях относительно расчетного наблюдается снижение коэффициента использования СНЭЭ;

3) режим работы, при котором уровень напряжения холостого хода ниже расчетного уровня и близок к минимальным значениям напряжения. В данном случае условия работы системы накопления электроэнергии изменяются на противоположные. Продолжительность режима разряда возрастает, средний уровень степени заряженности снижается.

Если во втором случае режима напряжения возникает ситуация увеличения доли неиспользуемой энергоемкости СНЭЭ, то в третьем случае доля неиспользуемой энергоемкости СНЭЭ уменьшается до околонулевых значений.

В представленных режимах работы наблюдаются различные условия работы СНЭЭ, меняющиеся от расчетных к более легким (второй вариант) или, наоборот, к более тяжелым условиям эксплуатации (третий вариант).

Вынужденные режимы питания межподстанционных зон существенно отличаются от нормальных по уровню напряжения в контактной сети и могут привести к ускоренному истощению ресурса накопителя электроэнергии в СНЭЭ [10]. Указанная картина наблюдается при принятых постоянном коэффициенте статизма и уровне опорного напряжения.

Задача обеспечения нормативного срока эксплуатации и сохранения расчетной наработки СНЭЭ может быть решена путем использования различных способов регулирования мощности СНЭЭ или адаптации коэффициентов статизма характеристик под уровень напряжения холостого хода смежных тяговых подстанций и тяговой нагрузки.

Таким образом, на основе рассмотренных структурных схем системы накопления электроэнергии и схемы питания межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения постоянного тока предложены функциональная схема управления с регулированием по уровню напряжения и соответствующая структурная схема межподстанционной зоны. Предложенный алгоритм регулирования реализован с учетом заданных характеристик системы накопления электроэнергии в разработанной модели Simcape/Simulink/Matlab.

Моделирование работы системы накопления электроэнергии по уровню напряжения позволяет оценить эффективность регулирования на основе характеристик, определить параметры системы накопления электроэнергии для различных условий формирования электротяговой нагрузки.

Совершенствование алгоритма на базе разработанной модели осуществляется по следующим направлениям: учет параметров и алгоритмов работы вольтодобавочных и других регулируемых устройств в системе тягового электроснабжения; учет показателей работы системы накопления электроэнергии (глубина разряда, степень заряженности, продолжительность и количество циклов работы); выбор схемных решений выпрямительно-инверторных преобразователей; ограничение перегрузки и скорости изменения нагрузки тяговых подстанций; регулирование систем накопления в системах тягового электроснабжения переменного тока с учетом регулирования напряжения и мощности, в том числе за счет регулируемых средств компенсации (статических компенсаторов и генераторов) реактивной мощности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, научный проект № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

Список литературы

1. Крюков, А. В. Концепция интеллектуальной системы тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 59–65.
2. Бадер, М. П. Современные технологии для перехода к интеллектуальным системам электроснабжения / М. П. Бадер. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 86–92.
3. Незевак, В. Л. Управление устройствами системы тягового электроснабжения на основе технологий Smart Grid / В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 618–621.

4. Герман, Л. А. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 23–33.
5. Баева, И. А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения / И. А. Баева. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 51–58. – DOI 10.20295/1815-588X-2019-1-51-58.
6. Незевак, В. Л. Концепция применения систем накопления электроэнергии в энергетическом комплексе ОАО «РЖД» / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 32–37.
7. Новиков, Н. Л. Интеллектуальная система управления многоуровневой интеграцией генерирующих станций и потребителей на основе системы накопления энергии / Н. Л. Новиков. – Текст : электронный. – URL: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149858606/Новиков%20Н.Л.pdf>. (дата обращения: 18.12.2023).
8. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – Ленинград : Энергия, 1975. – 416 с. – Текст : непосредственный.
9. Павлов, Г. М. Автоматика энергосистем / Г. М. Павлов, Г. В. Меркурьев. – Санкт-Петербург : Центр подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001. – 389 с. – Текст : непосредственный.
10. Незевак, В. Л. Имитационное моделирование работы устройств накопления электроэнергии в послеаварийных и вынужденных режимах работы системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев, П. В. Тарута. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 22–31.

References

1. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. The concept of an intelligent traction power supply system. *Innovatsionnyi transport – «Innotrans» Journal*, 2015, no. 1 (15), pp. 59-65 (In Russian).
2. Bader M.P. Modern technologies for transition to intellectual railway transport. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering*, 2013, no. 2 (50), pp. 86-92 (In Russian).
3. Nezevak V.L., Erbes V.V. Control of traction power supply system devices based on Smart Grid technologies. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona – Transport infrastructure of the Siberian region*, 2018, vol. 1, pp. 618-621 (In Russian).
4. German L.A., Kishkurno K.V. Voltage Regulation in Traction AC Railways. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no. 9, pp. 23-33 (In Russian).
5. Baeva I.A. Calculating procedure for the system of traction power supply of DC 3,0 kV in case of applying voltage regulating devices. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 51-58, DOI 10.20295/1815-588X-2019-1-51-58 (In Russian).
6. Nezevak V.L., Dmitriev A.D., Samolinov S.S. The concept of application of electric power storage systems in the energy complex of JSC «Russian Railways». *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2023, no. 3 (99), pp. 32-37 (In Russian).
7. Novikov N.L. *Intellektual'naiia sistema upravleniia mnogourovnevoi integratsiei generiruiushchikh stantsii i potrebitelei na osnove sistemy nakopleniia energii* [Novikov N.L. Intelligent control system for multi-level integration of generating stations and consumers based on an energy storage system]. Available at: <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149858606/> (accessed 18.12.2023).
8. Yurevich E.I. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [The theory of automatic control]. Leningrad, Energiia Publ., 1975, 416 p. (In Russian).
9. Pavlov G.M., Merkur'ev G.V. *Avtomatika energosistem* [Automation of power systems]. Saint-Petersburg, The Personnel Training Center of RAO UES of Russia Publ., 2001, 389 p. (In Russian).

10. Nezevak V.L. , Dmitriev A.D., Taruta P.V. Simulation modeling of the operation of electricity storage devices in post-accident and forced operating modes of the traction power supply system. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 4 (52), pp. 22-31 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Power supply of railway transport», OSTU.

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

E-mail: nezevakwl@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Моделирование процессов регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока с помощью устройств накопления электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 32 – 44.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V.L. Modeling of voltage regulation processes in DC traction power supply systems with the help of electricity storage devices. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 32-44 (In Russian).

УДК 656.21.001.2

М. А. Хаджимухаметова, С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидивалиев, Р. Ш. Бозоров

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВСТРЕЧНОГО ВЕТРА НА ПОЛУВАГОН ПРИ РОСПУСКЕ С ГОРБА ГОРКИ

Аннотация. В данной статье проведен анализ выбора типа вагонов в качестве плохого бегуна (отцепка) с учетом неблагоприятных условий при расчете высоты сортировочной горки. Исследование воздействия встречного ветра на полувагон при роспуске с вершины горки представляет собой обширное исследование, направленное на изучение воздействия атмосферных условий на поведение железнодорожного состава. В ходе этого исследования проведен анализ различных параметров, включая влияние скорости встречного ветра на скорость и траекторию движения полувагона, а также дана оценка аэродинамических параметров и произведены расчеты динамических сил, воздействующих на вагон. Основными методами исследования стали математическое моделирование и компьютерное моделирование с использованием современных программных пакетов, таких как SOLIDWORKS Flow Simulation. Эти инструменты позволили получить детальное представление о воздействии ветра на полувагон и его структурные элементы и проанализировать потенциальные риски и опасности, связанные с данным явлением. Результаты исследования позволили сделать ряд ключевых выводов. Максимальное аэродинамическое давление воздушного потока на вагон составляет 101,602 кПа. В частности, было установлено, что скорость встречного ветра существенным образом влияет на скорость движения полувагона и требует учета при планировании и управлении работы сортировочной горки. При сопоставлении скоростей движения крытых и полувагонов на сортировочной горке выявлено, что в результате изменения ускоряющего (скоростного) участка сортировочной горки в конце ускоряющего (скоростного) участка скорость полувагона на 34,6 % меньше, чем скорость крытого вагона. Кроме того, были установлены особенности аэродинамического давления на полувагон и его внутренние компоненты, что имеет значение для обеспечения безопасности и эффективности транспортных операций.

Это исследование имеет важное практическое значение для железнодорожной отрасли, поскольку его результаты могут быть использованы для разработки новых методов и технологий, направленных на улучшение безопасности и эффективности сортировки вагонов и железнодорожных перевозок. Кроме того, оно

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

вносит вклад в научное понимание атмосферных факторов, влияющих на транспортные системы, и может быть полезным для дальнейших исследований в этой области.

Исследование воздействия встречного ветра на полувагон при роспуске с вершины горки представляет собой значимый вклад в развитие транспортной науки и практики, а его результаты могут быть использованы для повышения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: сортировочная горка, встречный ветер, аэродинамическое давление, турбулентный воздушный поток, плохой бегун, полувагон.

**Matluba A. Khadjimukhametova, Samandar B. Sattorov, Shukhrat U. Saidivaliev,
Ramazon Sh. Bozorov**

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, the Republic of Uzbekistan

STUDY OF THE IMPACT OF HEADWIND ON A GONDOLA CAR WHEN LEAVING FROM THE TOP OF THE HUMP

Abstract. This article analyzes the selection of wagon types as a bad runner (uncoupling) considering unfavorable conditions when calculating the height of a sorting hill. The study of the impact of headwinds on a gondola car during descent from a hill represents an extensive investigation aimed at examining the influence of atmospheric conditions on the behavior of a railway composition. During this research, various parameters were analyzed, including the effect of headwind speed on the speed and trajectory of the gondola car, as well as the evaluation of aerodynamic parameters is also given and calculations of dynamic forces acting on the wagon are made. The main research methods were mathematical modeling and computer simulation using modern software packages such as SOLIDWORKS Flow Simulation. These tools provided a detailed understanding of the impact of wind on the gondola car and its structural elements and an analysis of potential risks and hazards associated with this phenomenon. The research results led to several key conclusions. The maximum aerodynamic pressure of the airflow on the wagon is 101.602 kPa. In particular, it was found that headwind speed significantly influences the speed of the gondola car and requires consideration in planning and managing sorting hill operations. When comparing the speeds of covered cars and gondola cars on the sorting hill, it was revealed that due to changes in the accelerating (speeding) section of the sorting hill, at the end of the accelerating (speeding) section, the speed of the gondola car is 34.6 % lower than the speed of the covered car. Additionally, specific characteristics of aerodynamic pressure on the gondola car and its internal components were established, which are crucial for ensuring the safety and efficiency of transport operations.

This study holds practical significance for the railway industry, as its results can be used to develop new methods and technologies aimed at improving the safety and efficiency of wagon sorting and railway transportation. Furthermore, it contributes to the scientific understanding of atmospheric factors affecting transportation systems and may be valuable for further research in this field.

The investigation into the impact of headwinds on a gondola car during descent from a hill represents a significant contribution to the advancement of transportation science and practice, and its outcomes can be utilized to enhance the safety and efficiency of railway transportation.

Keywords: hump, headwind, aerodynamic pressure, turbulent air flow, poor runner, gondola car.

В Республике Узбекистан реализуются меры по развитию транспортных систем, в том числе осуществляются мероприятия по разработке технологий, оптимизирующих и контролирующих управление процессами обработки вагонопотоков на сортировочных станциях железнодорожного транспорта. В Постановлении Президента Республики Узбекистан от 2 декабря 2017 г. «О мерах по совершенствованию транспортной инфраструктуры и диверсификации внешнеторговых маршрутов перевозки грузов на 2018 – 2022 годы» отмечены такие задачи, как «...повышение качества и безопасности услуг железнодорожного транспорта в целом, строительство новых железнодорожных магистралей, повышение уровня электрификации железных дорог, ...создание необходимых условий для ускоренного развития железнодорожной сети Республики Узбекистан». При реализации данных задач важными аспектами являются выбор оптимальной высоты горок сортировочных станций и разработка способа обеспечения установленной нормы скоростей соударения вагонов к «группе стоячих вагонов».

Теоретические и практические исследования по развитию и совершенствованию работы сортировочных станций проводятся в научных центрах ведущих стран, в университетах и научно-исследовательских институтах, в том числе: University of Baltimore (США), Technische

Universität Berlin (Германия), Swedish national Railway Administration (Швеция), Петербургский государственный железнодорожный университет (Россия), Российский университет транспорта (Россия), Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (Украина), Ташкентский государственный транспортный университет (Узбекистан).

Ряд ученых, в частности, академик Образцов В. Н., Родимов Б. А., Туранов Х. Т. и другие, заложивших основы существующих в настоящее время методов определения высоты сортировочной горки, отметили, что порожний крытый вагон необходимо рассматривать как плохой бегун в самых сложных условиях [1, 3, 5, 7]. Считалось, что порожний вагон закрытого типа движется с сортировочной горки под действием встречного ветра, и его прибытие в расчетную точку гарантирует прибытие всех оставшихся вагонов. Однако научные исследования показали, что порожний полувагон, спущенный с высоты сортировочной горки, не может достичь расчетной точки, которую достиг порожний вагон крытого типа, спущенный с той же высоты сортировочной горки [2, 4, 6, 8].

Запишем теорему изменения кинетической энергии для несвободной материальной точки в смещении АВ, в которой может происходить движение вагона. При этом, учитывая начальную скорость V_A и применяя ее к конечной рассматриваемой задаче, получаем формулу:

$$\frac{G}{2g} \cdot V_A^2 + G \cdot \sin i \cdot x_{AB} = \frac{G}{2g} \cdot V_B^2 - K_f \cdot G \cdot \cos i \cdot x_{AB} + \mu \cdot G \cdot \cos i \cdot x_{AB} - F_{\text{встр}} \cdot x_{AB}, \quad (1)$$

где G – сила тяжести вагона, кН;

V_A, V_B – начальная и конечная скорость вагона, м/с;

K_f – коэффициент трения качения;

μ – коэффициент трения скольжения;

x_{AB} – протяженность участка, м.

С учетом малых углов ($i \leq 5^\circ$) $\sin i \approx i$, $\cos i \approx 1$ выражение (1) приобретает вид:

$$\frac{G}{2g} \cdot V_A^2 + G \cdot i \cdot x_{AB} = \frac{G}{2g} \cdot V_B^2 - K_f \cdot G \cdot x_{AB} + \mu \cdot G \cdot x_{AB} - F_{\text{встр}} \cdot x_{AB}, \quad (2)$$

где $F_{\text{встр}}$ – продольная сила аэродинамического сопротивления ветра, дующего против движения вагона, кН:

$$F_{\text{встр}} = P_{\text{аэр1}} \cdot S_1 + P_{\text{аэр2}} \cdot S_2, \quad (3)$$

где $P_{\text{аэр1}}, P_{\text{аэр2}}$ – аэродинамическое давление ветра, действующего на поверхность вагона, Па;

S_1, S_2 – наружные и внутренние поверхности кузова вагона, подверженные сопротивлению ветра, м² (рисунок 1).

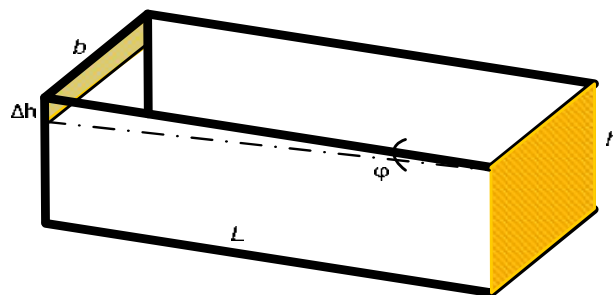


Рисунок 1 – Чертеж наружных и внутренних поверхностей кузова полувагона, подверженного сопротивлению ветра

Подвижной состав железных дорог, тяги поездов и электрификация

При определении кинематических параметров вагона, движущегося по сортировочной горке, характер ветра может не соответствовать направлению определенных осей. Как указано в научной работе [8], ветер действует под любым углом.

Причиной того, что открытый полувагон, движущийся по сортировочной горке, не достигает расчетной точки, являются силы аэродинамического воздействия встречного ветра в направлении оси ОХ (рисунок 2).

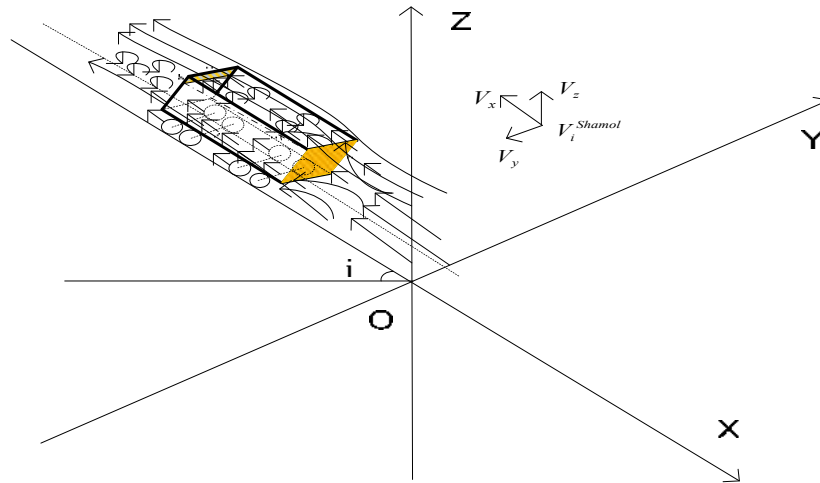


Рисунок 2 – Силы аэродинамического воздействия встречного ветра в направлении оси ОХ

Величины аэродинамического давления в соответствии с рисунком 2 и в каждом направлении записывались в виде:

$$\begin{cases} P_{\text{аэ}i} = C_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2; \\ P_{\text{аэ}x} = C_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_x^2; \\ P_{\text{аэ}y} = C_y \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_y^2; \\ P_{\text{аэ}z} = C_z \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_z^2; \\ P_{\text{аэ}1} = P_{\text{аэ}2} = C_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_x^2. \end{cases} \quad (4)$$

Основные поверхности поперечного сечения в соответствии с техническими характеристиками вагона записаны в виде:

$$S_1 = b \cdot H; \quad (5)$$

$$S_2 = l \cdot b \cdot i, \quad (6)$$

где b – ширина полувагона, м;
 H – высота полувагона, м;
 l – длина полувагона, м.

В соответствии с выражениями (4) – (6) и, подставляя в выражение (3) общую силу сопротивления движению вагона в направлении оси ОХ, получаем равенство:

$$F_{\text{встр}} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot (b \cdot H + l \cdot b \cdot i) = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot b \cdot (H + l \cdot i), \quad (7)$$

где C_x – коэффициент воздушного сопротивления.

Подставляя выражение (7) в уравнение (2), получаем соотношения:

$$\frac{G}{2g} \cdot V_A^2 + G \cdot i \cdot x_{AB} = \frac{G}{2g} \cdot V_B^2 - K_f \cdot G \cdot x_{AB} + \mu \cdot G \cdot x_{AB} + 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot b \cdot (H + l \cdot i) \cdot x_{AB}; \quad (8)$$

$$V_B = \sqrt{V_A^2 + 2g \cdot i \cdot x_{AB} + 2g \cdot K_f \cdot x_{AB} - 2g \cdot \mu \cdot x_{AB} + \frac{C_x \cdot g \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot b \cdot (H + l \cdot i) \cdot x_{AB}}{G}}. \quad (9)$$

В результате решения выражения (8) создается возможность расчета кинематических параметров открытого полувагона, движущегося по сортировочной горке, и универсального четырехосного крытого вагона. Путем решения выражения (10) рассчитываются ускорение, кинематические характеристики вагонов, движущихся по сортировочной горке:

$$\begin{cases} a_{kii} = a_i \cdot (i - |w_{ii}|) \\ a_i = \frac{G}{M} \cdot 10^3 \\ l_{kii} = V_A \cdot t_{ii} + \frac{1}{2} |a_{kii}| \cdot t_{ii}^2, \end{cases} \Rightarrow l_{kii} = V_A \cdot t_{ii} + \frac{1}{2} a_i \cdot (i - |w_{ii}|) \cdot t_{ii}^2 \Rightarrow V_B = V_A + a_i \cdot (i - |w_{ii}|) \cdot t_{ii}^2; \quad (10)$$

где $a_i = \text{const}$ – условное обозначение линейного ускорения вагона при равномерно замедленном движении в зонах торможения участков тормозного пути, м/с²;

i – безразмерная величина, условно характеризующая наклон профиля горки с учетом влияния силы проекции F_{vx} встречного ветра;

$|w_{ii}|$ – безразмерная величина, условно характеризующая удельное сопротивление различных сопротивлений движению с учетом продольного воздействия ветра и (или) $|w_{ii}|$ имеет размер, которого нет в системе единиц измерения, кгс/т:

$$w_{Ti} = k_{\text{торм}} + k_{0i} + k_{\text{св}} + k_{\text{сн}}, \quad (11)$$

где $k_{\text{торм}} = F_{\text{торм}}/G_1$, $k_{0i} = F_{\text{тр } xi}/G_1$ или $k_{0i} = F_{0i}/G_1$, $k_{\text{св}} = F_{\text{св}}/G_1$, $k_{\text{сн}} = F_{\text{сн}}/G_1$ – коэффициенты, учитывающие силы $F_{\text{торм}}$ при торможении замедлителя вагона, силы $F_{\text{тр } x} = F_{0i}$ от основных сопротивлений в доле G_1 от невращающихся частей вагона и силы тяжести вагона, силы $F_{\text{св}}$ от окружающей среды и ветра, силы $F_{\text{сн}}$ от снега и инея [9, 10].

Отметим, что удельное сопротивление $|w_{ii}|$ различных сопротивлений движению в зонах торможения участков тормозного пути является непостоянной величиной ($|w_{ii}| \neq \text{const}$), при уменьшении скорости вагона происходит ее увеличение.

В общем случае скорость и время движения вагона определялись выражениями:

$$\begin{cases} V_B = \sqrt{V_A^2 + 2g \cdot i \cdot x_{AB} + 2g \cdot K_f \cdot x_{AB} - 2g \cdot \mu \cdot x_{AB} + \frac{C_x \cdot g \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot b \cdot (H + l \cdot i) \cdot x_{AB}}{G}}; \\ t_{ii} = \frac{(V_B - V_A)}{a_i \cdot (i - |w_{ii}|)}. \end{cases} \quad (12)$$

При выполнении расчета с помощью пакета программирования *MATLAB* получен график, представленный на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что в результате изменения длины скоростного участка сортировочной горки от 0 до 80 м скорость открытого полувагона в конце скоростного участка была на 34,6 % меньше, чем у крытого вагона. Это показывает, что использование в инженерных расчетах по определению высоты сортировочной горки крытых вагонов в качестве наихудшего бегуна было неверным. Применение с этой целью открытого полувагона как плохого бегуна, а также использование программного пакета *SolidWorks Flow Simulation* для оценки влияния скорости встречного ветра обеспечивает повышение точности результатов расчета. В частности, скорость и давление встречного ветра, которые могут воздействовать на кузов открытого полувагона на начальном этапе процесса моделирования,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

можно увидеть на рисунках 4 и 5. В процессе моделирования изучались воздействия на кузов открытого полувагона с учетом того, что подвагонная конструкция всех вагонов (тележка 18-100, колесная пара) и постороннее воздействие будут одинаковыми.

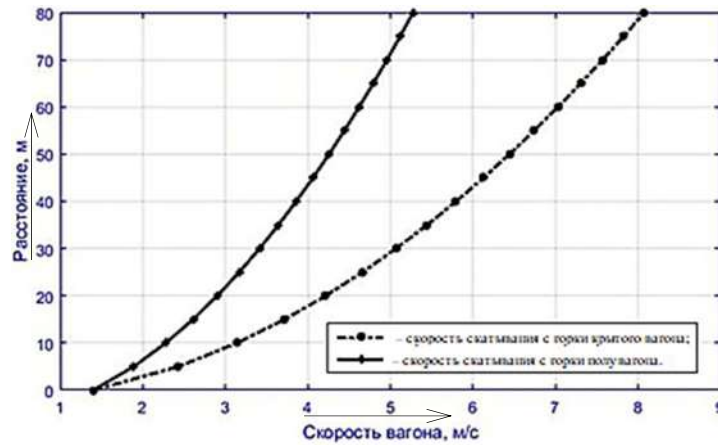


Рисунок 3 – График скорости движения крытых вагонов и полувагонов на сортировочной горке

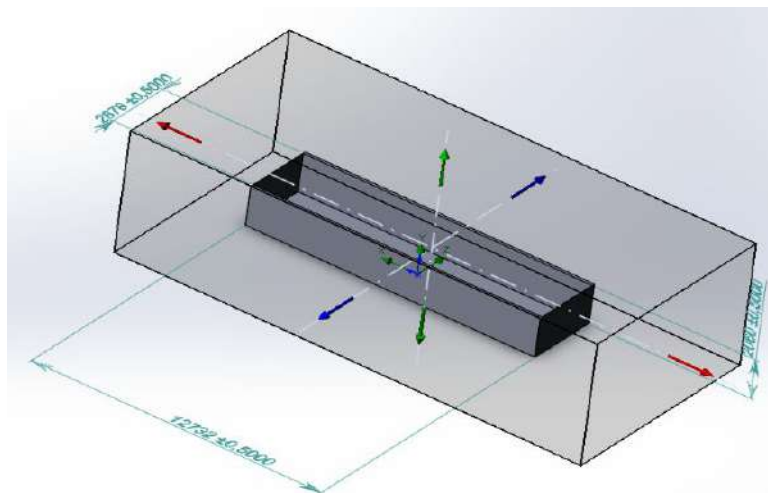


Рисунок 4 – Чертеж расчетной области полувагона, скатывающегося с сортировочной горки

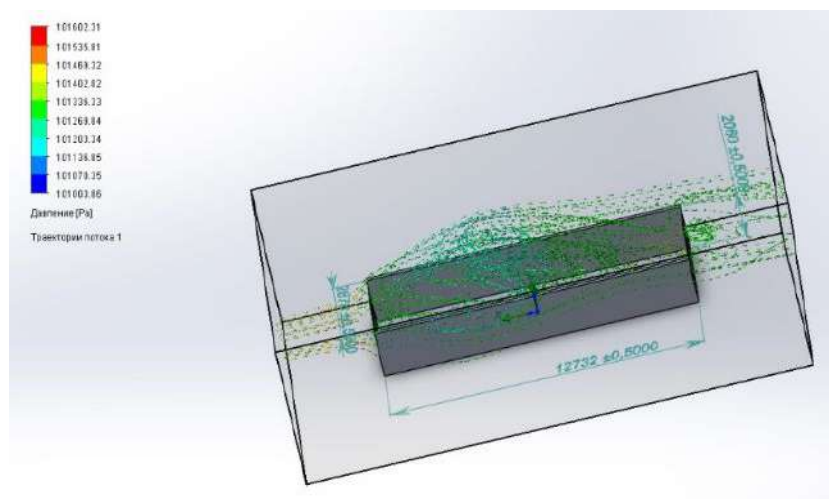


Рисунок 5 – Чертеж модели воздействия на полувагон встречного воздушного потока

Из рисунков 4 и 5 видно, что воздушный поток приобретает турбулентный характер внутри и сзади открытого полувагона. Максимальное аэродинамическое давление воздушного потока, действующего на вагон, составляет 101,602 кПа. В процессе расчета высоты сортировочной горки учитывалось влияние воздушного потока, действующего только на

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

переднюю часть открытого полувагона, однако в процессе моделирования отмечалось возникновение турбулентного воздушного потока, образующегося внутри порожнего открытого полувагона, и аэродинамических воздействий на торцевую поперечную стенку вагона (рисунки 6 и 7).

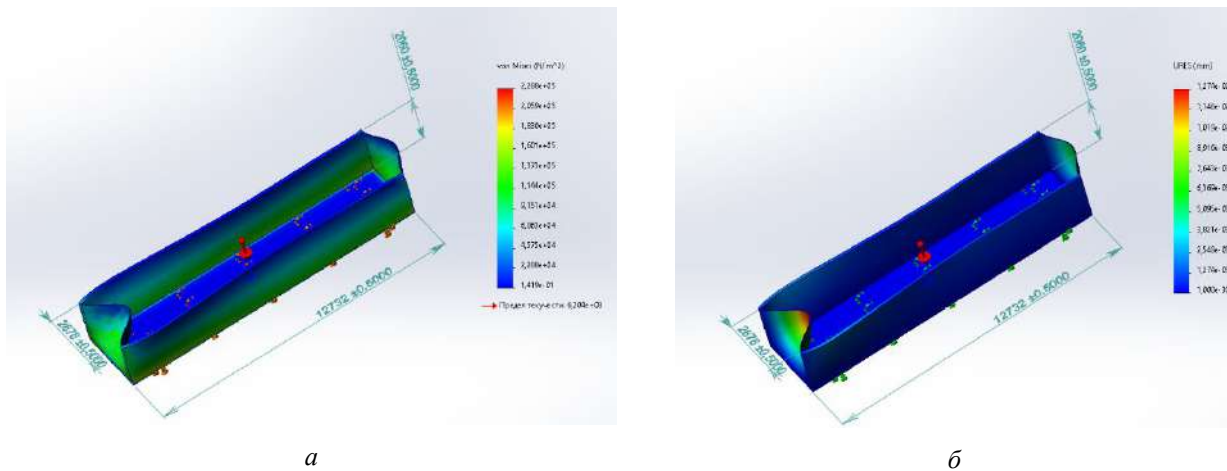


Рисунок 6 – Расчет аэродинамического давления и расстояния скольжения, действующих на переднюю и внутреннюю заднюю стенки открытого полувагона под действием встречного воздушного потока

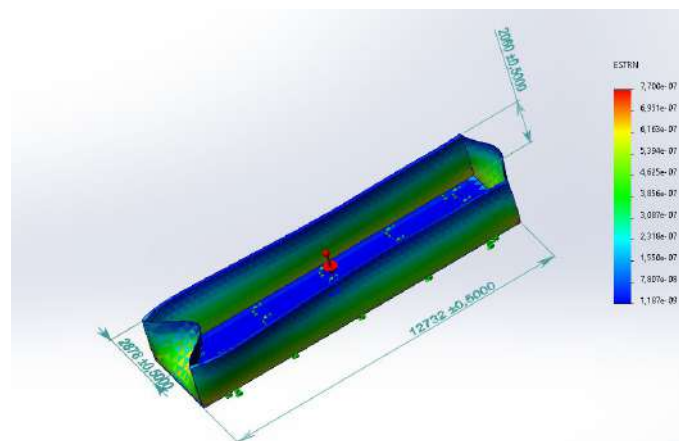


Рисунок 7 – Расчет деформации передней и внутренней задней стенок открытого полувагона под действием встречного воздушного потока

В результате того, что в процессе моделирования не учитываются деформируемые нижние ходовые части вагона и пол кузова прикреплен, в кузове возникают изгибы, как показано на рисунке 7. Такого рода изгибы доказывают актуальность научной работы, т. е. мы можем видеть давление, оказываемое на переднюю и внутреннюю заднюю стенки порожнего полувагона в результате действия воздушного потока.

При определении кинематических параметров движущегося вагона на сортировочной горке учитывается влияние ветра под любым углом, а причиной того, что движущийся открытый полувагон не достигает расчетной точки, являются аэродинамические силы встречного ветра.

Было обнаружено, что в конце скоростного участка открытый полувагон развивает скорость на 34,6 % меньше, чем крытый вагон. Основной причиной этого является воздушный поток, который приобретает турбулентный характер внутри и сзади открытого полувагона.

Анализ движения крытых и открытых полувагонов, движущихся по сортировочной горке, показал, что высота сортировочной горки, определенная для крытого вагона, принятого в качестве плохого бегуна, оказалась недостаточной для открытого полувагона при сложных условиях.

Список литературы

1. Образцов, В. Н. Станции и узлы / В. Н. Образцов. – Москва : Трансжелдориздат, 1938. – 492 с. – Ч. II. – Текст : непосредственный.
2. Земблинов, С. В. Станции и узлы / С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – Москва : Трансжелдориздат, 1963. – 348 с. – Текст : непосредственный.
3. Савченко, И. Е. Железнодорожные станции и узлы : учебник / И. Е. Савченко, С. В. Земблинов, И. И. Страковский; под. ред. В. М. Акулиничева, Н. Н. Шабалина. – Москва : Транспорт, 1980. – 479 с. – Текст : непосредственный.
4. Родимов, Б. А. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных горок / Б. А. Родимов, В. Е. Павлов, В. Д. Прокинова. – Москва : Транспорт, 1980. – 96 с. – Текст : непосредственный.
5. Акулиничев, В. М. Расчет и проектирование сортировочных горок большой и средней мощности : учебное пособие / В. М. Акулиничев, Л. П. Колодий. – Москва : МИИТ, 1981. – 61 с. – Текст : непосредственный.
6. Рудановский, В. М. О попытке критики теоретических положений динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки / В. М. Рудановский, И. П. Старшов, В. А. Кобзев. – Текст : непосредственный // Бюллетень транспортной информации. – 2016. – № 6 (252). – С. 20–25.
7. К вопросу движения вагона по уклону железнодорожного пути / Ю. О. Пазойский, В. А. Кобзев, И. П. Старшов, В. М. Рудановский. – Текст : непосредственный // Бюллетень транспортной информации. – 2018. – № 2 (272). – С. 35–37.
8. Saidivaliyev Sh.U., Sattorov S.B., Bozorov R.Sh. Bo'sh vagonning saralash tepaligi profilida harakati tahlili. *IQRO*, 2023, no. 2 10-16 bet.
9. Бозоров, Р. Ш. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Afrosiyob» на встречные поезда / Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 96–107.
10. Khadjimuhametova M., Merganov A., Egamberdiev R. An innovative method of designing the surface and elements of the hump profiles. *AIP Conf. Proc.* 2432, 030046 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0089818>.

References

1. Obraztsov V.N. *Stantsii i uzly* [Stations and nodes]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938, Part II, 492 p. (In Russian).
2. Zemblinov S.V., Strakovskii I.I. *Stantsii i uzly* [Stations and nodes]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963, 348 p. (In Russian).
3. Savchenko I.E., Zemblinov S.V., Strakovskii I.I., Akulinichev V.M., Shabalin N.N. ed. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly: uchebnik* [Railway stations and junctions: textbook]. Moscow, Transport Publ., 1980, 479 p. (In Russian).
4. Rodimov B.A., Pavlov V.E., Prokinova V.D. *Proektirovanie mekhanizirovannykh i avtomatizirovannykh sortirovochnykh gorok* [Design of mechanized and automated sorting slides]. Moscow, Transport Publ., 1980, 96 p. (In Russian).
5. Akulinichev V.M., Kolodii L.P. *Raschet i proektirovanie sortirovochnykh gorok bol'shoi i srednei moshchnosti: uchebnoe posobie* [Calculation and design of sorting slides of large and medium capacity: a textbook]. Moscow, Moscow Institute of Transport Engineers Publ., 1981, 61 p. (In Russian).
6. Rudanovskii V.M., Starshov I.P., Kobzev V.A. About the attempt of criticism of theoretical positions on dynamics of the car rolling on the marshalling hump slope. *Biulleten' transportnoi informatsii – Transport Information Bulletin*, 2016, no. 6 (252), pp. 20-25 (In Russian).
7. Pazoiskii Yu.O., Kobzev V.A., Starshov I.P., Rudanovskii V.M. On the question of car movement on the railway track incline. *Biulleten' transportnoi informatsii – Transport Information Bulletin*, 2018, no. 2 (272), pp. 35-37 (In Russian).

8. Saidivaliyev Sh.U., Sattorov S.B., Bozorov R.Sh. Bo'sh vagonning saralash tepaligi profilida harakati tahlili. *IQRO*, 2023, no. 2 10-16 bet.

9. Bozorov R.Sh. Aerodynamic impact of the high-speed electric train «Afrosiyob» on opposite trains. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 96-107.

10. Khadjimuxametova M., Merganov A., Egamberdiev R. An innovative method of designing the surface and elements of the hump profiles. *AIP Conf. Proc.* 2432, 030046 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0089818>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хаджимухаметова Матлуба Адиловна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (94) 695-96-26.

E-mail: matluba_78@mail.ru

Сатторов Самандар Бахтиерович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: sattorovsamandar100@gmail.com

Саидвалиев Шухрат Умарходжаевич

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

Бозоров Рамазон Шамилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хаджимухаметова, М. А. Исследование воздействия встречного ветра на полувагон при роспуске с горба горки / М. А. Хаджимухаметова, С. Б. Сатторов, Ш. У. Саидвалиев, Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 44 – 52.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Xadjimuxametova Matluba Adilovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (94) 695-96-26.

E-mail: matluba_78@mail.ru

Sattorov Samandar Baxtiyorovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, senior lecturer of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: sattorovsamandar100@gmail.com

Saidivaliev Shukhrat Umarhodjaevich

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 system», TSTU.

Phone: +998 (97) 462-21-29.

E-mail: shuxratxoja@mail.ru

Bozorov Ramazon Shamilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryo'lchiler st., 1, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khadjimukhametova M.A., Sattorov S.B., Saidivaliev Sh.U., Bozorov R.Sh. Study of the impact of headwind on a gondola car when leaving from the top of the hump. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 44-52 (In Russian).

А. П. Осипов, Д. А. Медведев

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

ВИРТУАЛЬНАЯ СЦЕПКА. ПОДХОДЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Аннотация. В статье рассматривается технология интервального регулирования движения поездов «Виртуальная сцепка». Данная технология позиционируется как средство повышения пропускной способности участков железных дорог, а также как дополнительная мера повышения безопасности движения. На текущий момент данная технология является одной из наиболее перспективных.

Основными принципами реализации названной технологии является непрерывный обмен информацией по цифровому радиоканалу между локомотивами попутно следующих поездов, в рамках которого производится передача информации о местонахождении локомотива, его режиме работы и скорости движения. Эффектом от использования технологии является синхронизация движения попутно следующих поездов, что способствует снижению межпоездного интервала, повышению энергоэффективности движения поездов и снижению влияния человеческого фактора. В условиях применения современных систем автоблокировки вместе с системами автоматического управления движением поезда можно достичь попутного следования поездов на расстоянии не более тормозного пути экстренного торможения.

В рамках данной статьи проводится анализ применения реализованной на сети железных дорог России технологии «Виртуальная сцепка» в части организации движения поездов, а также перспектив ее развития с учетом совершенствования технической базы. Дополнительно производится анализ наиболее близкой к реализации и перспективной технологии «Виртуальная сцепка» на базе европейской системы железнодорожной автоматизации ERTMS. Методом проведенного исследования является анализ научных публикаций по тематике разработки и применения технологии «Виртуальная сцепка», а также технологических документов. Целью исследования является анализ опыта применения технологии и выявление ее существующих недостатков. Итогом проведенного анализа является формирование предложений по совершенствованию технологии «Виртуальная сцепка». Предложения включают в себя доработку технических средств, в частности, совершенствование системы автоведения ИСАВП-РТ-М с реализацией функцией автоматического объединения виртуально соединенных поездов и усиление оборудования цифровой радиосвязи, а также изменение технологии формирования и пропуска виртуально соединенных поездов.

Ключевые слова: виртуальная сцепка, автоведение, сокращенные межпоездные интервалы, пропускная способность, железнодорожный транспорт.

Aleksander P. Osipov, Dmitriy A. Medvedev

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

VIRTUAL COUPLING. APPLICATION TECHNOLOGY

Abstract. The article discusses the technology of train separation called «Virtual Coupling». This technology is positioned as a means to increase the carrying capacity of railway sections and as an additional measure to enhance the safety of train operations. Currently, this technology is one of the most promising ones.

Modern train control systems facilitate continuous information exchange via digital radio channels between locomotives traveling in the same direction. This exchange includes data on location, operating mode, and speed. This technology synchronizes train movements, reducing inter-train intervals, enhancing energy efficiency, and mitigating human error. When integrated with train protection systems, it ensures trains maintain safe distances, even within emergency braking distances.

The article examines the application of "Virtual Coupling" technology on the Russian railway network for organizing the train movement and explores its future development alongside infrastructure enhancements. It also analyzes a technology closely related to "Virtual Coupling," drawing from the European Rail Traffic Management System (ERTMS) as a promising railway automation system. Research methods include analyzing scientific publications and technological documents to assess the technology's application and potential. The goal of the analysis is to evaluate its effectiveness and propose improvements for operational efficiency. The proposals include refinement of technical means, particularly the enhancement of the guidance system (modernized intelligent distributed traction automated train driving system) with the implementation of automatic train coupling function for virtually connected trains, reinforcement of digital radio communication equipment, as well as alteration of the technology for forming and passing virtually connected trains.

Keywords: virtual coupling, automatic train control, reduced inter-train intervals, carrying capacity, rail transport.

Железнодорожный транспорт в настоящее время играет большую роль в развитии и поддержании как российской, так и общемировой экономики. По железнодорожным магистралям каждый день осуществляется перевозка широкой номенклатуры различных грузов, а также тысяч пассажиров, что предъявляет значительные требования как к пропускной способности участков и направлений, так и к обеспечению безопасности движения. Удовлетворению все более возрастающих требований служит целый комплекс систем железнодорожной автоматики, с помощью которых реализуется новая технология «Виртуальная сцепка».

«Виртуальная сцепка» – технология, в рамках которой между локомотивами, следующими друг за другом в попутном направлении, устанавливается соединение по радиоканалу для передачи информации о параметрах движения поезда, его местоположении и допустимой скорости движения с ведущего локомотива на ведомый. На основе полученной с ведущего локомотива информации бортовыми системами локомотива ведомого поезда осуществляется безопасное и энергоэффективное следование с минимальными межпоездными интервалами.

Сегодня технология «Виртуальная сцепка» активно применяется на участках Восточного полигона сети железных дорог России, что позволило не только накопить значительный эксплуатационный опыт, но и обозначить недостатки действующей технологии. Данная статья посвящена анализу преимуществ и недостатков технологии «Виртуальная сцепка», а также обозначению путей ее развития.

Предпосылки появления «Виртуальной сцепки». На ранних этапах существования железных дорог значительное внимание уделялось вопросу информирования машиниста о свободности впередилежащего участка пути. Одним из первых средств, применяемых для информирования машинистов о разрешении на занятие перегона или станции, были семафоры, которые в эпоху электрификации были заменены на светофоры. Однако в эпоху электрожелезнодорожной системы и полуавтоблокировки светофоры продолжали выполнять ту же функцию, что и семафоры – ограничивали занятие перегона более чем одним поездом.

Ситуация кардинально изменилась с появлением автоблокировки, что позволило как увеличить количество светофоров (на перегонах появились проходные), так и конкретизировать передаваемую ими информацию. Отныне светофор указывал на свободу группы путевых участков (блок-участков) позади себя, что позволяло машинистам контролировать положение впередиидущих поездов либо препятствий. Также автоблокировка позволила увеличить количество поездов на перегоне. Вместе с тем возрастающие скорости движения, трудные план и профиль пути, а также погодные условия снижали эффективность светофоров, усложняя их восприятие машинистом. Дополнением к автоблокировке служила автоматическая локомотивная сигнализация, позволившая улучшить информирование машиниста и производить контроль допустимой скорости поезда.

Дальнейшее развитие как систем контроля и управления движением поездов, так и средств передачи данных привело к тому, что появилась возможность передачи в реальном времени информации о параметрах движения впередиидущего поезда, что и привело к появлению технологии «Виртуальная сцепка».

Применение технологии «Виртуальная сцепка» на железных дорогах России.

В настоящее время Россия является единственной страной, на территории которой производится постоянная эксплуатация описываемой технологии на участках общего пользования. Движение по технологии «Виртуальная сцепка» осуществляется электровозами 2ЭС5К (ЗЭС5К) «Ермак», оборудованными модифицированной системой автоведения ИСАВП-РТ-М.

ИСАВП-РТ-М – интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов с распределенной тягой. Система является усовершенствованной версией системы УСАВП и позволяет осуществлять ведение поездов повышенных масс и длины, в том числе при наличии локомотивов, распределенных по длине поезда. Система состоит из ряда модулей, среди которых основными являются блок «Ковчег» – блок электроники локомотива, осуществляю-

Управление процессами перевозок

щей обработку всей ответственной информации, блока управления движением локомотива, а также цифровым радиомодемом, обеспечивающим установление соединения между локомотивами по радиоканалу. Вывод информации осуществляется на блок МСУД системы информирования машиниста (СИМ). Система работает в увязке с действующими локомотивными устройствами безопасности (КЛУБ, БЛОК, САУТ). Взаимодействие локомотивных устройств представлено на рисунке 1.

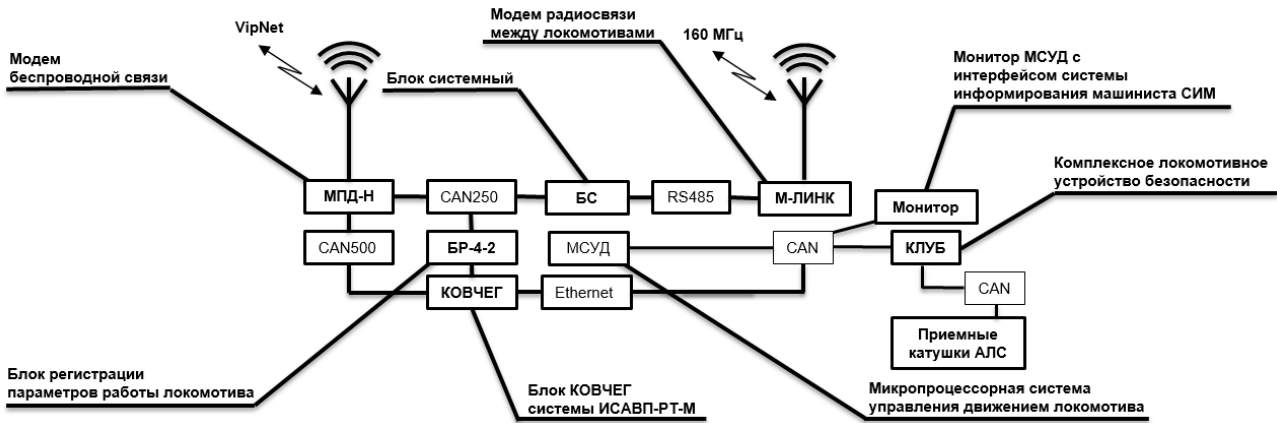


Рисунок 1 – Взаимодействие локомотивных устройств при реализации «Виртуальной сцепки» на базе системы ИСАВП-РТ-М

В настоящее время виртуальное соединение поездов производится путем ручного ввода в аппаратуру системы автоведения информации о сетевом адресе, по которому будет осуществляться обмен данными. Информация о сетевом адресе вводится машинистами как ведущего локомотива, так и ведомого. Объединение поездов в виртуальную сцепку может производиться как на станции, так и на перегоне. После установления виртуального соединения между поездами по цифровому радиоканалу начинается взаимная передача информации о режиме следования ведущего поезда, скорости, координате, показаниях локомотивного светофора, а также режиме работы системы автоведения. Следование поездов, объединенных по технологии «Виртуальная сцепка», может осуществляться как в автоматическом режиме («Автоведение»), так и в ручном режиме («Советчик»). Система позволяет как информировать машиниста ведомого поезда о параметрах ведущего поезда, так и производить передачу ответственной информации в локомотивную аппаратуру. Индикация локомотивной аппаратуры ведомого поезда при технологии «Виртуальная сцепка» приведена на рисунке 2.

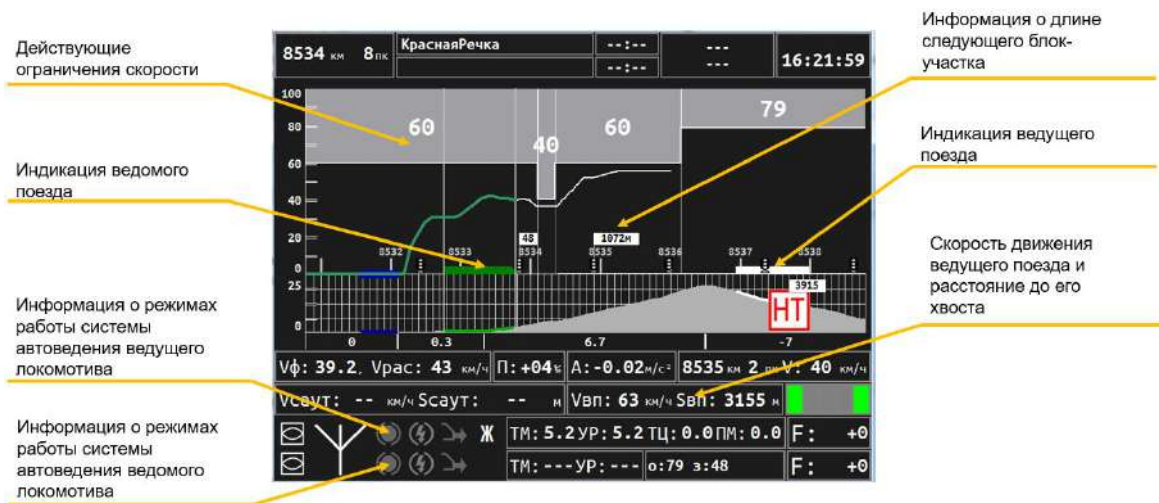


Рисунок 2 – Индикация локомотивной аппаратуры ведомого поезда в составе «Виртуальной сцепки»

Эффектом от применения технологии является снижение влияния человеческого фактора на безопасность движения поезда. Дополнительным эффектообразующим фактором является повышение допустимой скорости движения ведомого виртуально соединенного поезда в режиме «Автоведение» при проследовании светофора с желтым огнем. В этом случае происходит сближение попутно следующих поездов и соответствующее сокращение фактического межпоездного интервала при безусловном обеспечении безопасности движения, что обеспечивается непрерывной передачей на ведомый поезд информации о положении и режиме следования ведущего поезда [1 – 2]. Информированность о характере движения ведущего поезда позволяет повысить энергооптимальность движения ведомого поезда [3].

Организация движения поездов по технологии «Виртуальная сцепка». На сети железных дорог России движение поездов по технологии «Виртуальная сцепка» осуществляется в соответствии с действующим Технологическим процессом организации движения поездов с использованием технологии интервального регулирования «Виртуальная сцепка» на участках Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог [4]. Этим документом определяются участки применения технологии «Виртуальная сцепка», требования к инфраструктуре, подвижному составу и порядку работы служб при организации движения виртуально соединенных поездов.

В соответствии с действующими нормативными документами «Виртуальная сцепка» применяется как средство для повышения пропускной и провозной способности железнодорожных участков в условиях штатной эксплуатации и в период «окон». Согласно Технологическому процессу формирование, расформирование и переформирование виртуально соединенных поездов осуществляется по приказу поездного диспетчера (ДНЦ) с записью приказа в журнале диспетчерских распоряжений формы ДУ-58. Схема взаимодействия работников железнодорожного транспорта в типовых технологических ситуациях представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема взаимодействия работников при организации движения виртуально соединенных поездов при действующей технологии (здесь и далее ДНЦ – поездной диспетчер, ДСП – дежурный по станции, ТЧД – локомотивный диспетчер, ЛБ – локомотивные бригады виртуально соединенных поездов)

Данный регламент был разработан во время начала тиражирования технологии «Виртуальная сцепка» в 2019 г. и до настоящего времени не претерпел значительных изменений. В условиях постоянного повышения доли локомотивов, пригодных для виртуального соединения, были выявлены основные организационные недостатки действующей технологии.

1. Необходимость участия поездного диспетчера во всех этапах виртуального соединения поездов, что выражается в необходимости передачи приказов с регистрацией в журнале формы ДУ-58. В соответствии с методикой расчета загрузки поездного диспетчера [5] суммарный бюджет времени для работы с отдельными поездами рассчитывается по формуле:

$$\sum T_{\text{поезд}}^j = T_{\text{катег}}^{\text{все}} + T_{\text{груз}} + T_{\text{пригород}}^{\text{пасс.и}} + T_{\text{пасс}} + T_{\text{сбор}} + T_{\text{мест}}, \text{ мин}, \quad (1)$$

где $T_{\text{катег}}^{\text{все}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми категориями поездов, мин;

$T_{\text{груз}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми грузовыми поездами, мин;

$T_{\text{пригород}}^{\text{пасс.и}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми пассажирскими и пригородными поездами, мин;

$T_{\text{пасс}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми пассажирскими поездами, мин;

$T_{\text{сбор}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми сборными поездами, мин;

$T_{\text{мест}}$ – затраты времени на операции, возникающие со всеми передаточными, вывозными поездами и диспетчерскими локомотивами, мин.

Затраты времени на операции со всеми грузовыми поездами определяются по формуле:

$$T_{\text{груз}} = t_{10} (N_{\text{участ}} + N_{\text{сбор}} + N_{\text{передат}} + N_{\text{дисп. лок}}), \text{ мин}, \quad (2)$$

где $N_{\text{участ}}$ – количество грузовых поездов, следующих в границах диспетчерского участка;

$N_{\text{сбор}}$ – количество сборных поездов, следующих в границах диспетчерского участка;

$N_{\text{передат}}$ – количество передаточных поездов, следующих в границах диспетчерского участка;

$N_{\text{дисп. лок}}$ – количество диспетчерских локомотивов, следующих в границах диспетчерского участка;

t_{10} – укрупненный норматив времени работы с названными выше категориями поездов, мин.

Основной проблемой является то, что данный норматив не учитывает работу с виртуально соединенными поездами. Пути решения этой проблемы являются либо пересмотр норматива, либо введение отдельной категории «Виртуально соединенные поезда» с собственным укрупненным нормативом работы, который на одну пару поездов можно определить как

$$t_{\text{в. сц}} = t_{\text{соед}} + t_{\text{пр}} + t_{\text{раз}}, \text{ мин}, \quad (3)$$

где $t_{\text{соед}}$ – формирование, передача и регистрация приказа на соединение поездов, мин;

$t_{\text{пр}}$ – формирование, передача и регистрация приказа на обеспечение следования поездов, мин;

$t_{\text{раз}}$ – формирование, передача и регистрация приказа на разъединение поездов, мин.

Среднее время формирования, передачи и регистрации приказа в зависимости от навыков поездного диспетчера и оснащенности рабочего места составляет 0,5 – 1,5 мин. Таким образом, загрузка поездного диспетчера будет увеличиваться прямо пропорционально количеству поездов, следующих по технологии «Виртуальная сцепка». В настоящее время потребность в диспетчерских приказах обусловлена необходимостью корректного учета пропущенных по участку поездов на виртуальной сцепке, что в дальнейшем может быть

решено автоматизацией заполнения журнала формы ДУ-58. Ведение журнала и сопровождение виртуально соединенных поездов на участке приводят к увеличению загрузки поездного диспетчера, которое также необходимо учитывать.

2. Все еще происходящие случаи ошибок при подборе локомотивов и бригад, что может быть решено дальнейшим увеличением доли оборудованных локомотивов и обученных бригад.

Перспективный вариант оптимизации организации движения по технологии «Виртуальная сцепка» подразумевает отказ от регистрации диспетчерских приказов в журнале ДУ-58, вместо этого передача приказов всем причастным работникам выполняется в устной форме. Меняется также технология работы диспетчерского персонала: подбор пар поездов для виртуального сцепления производится на все нитки графика, а не только на специализированные нитки грузовых поездов. Таким образом, одиночное следование допускается только для поездов, не подлежащих виртуальному объединению по причине невозможности виртуального соединения или из-за дефектов подвижного состава. Схема взаимодействия диспетчерского персонала и локомотивных бригад при организации движения виртуально соединенных поездов при перспективной технологии пропуска поездов приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема взаимодействия работников при организации движения виртуально соединенных поездов при перспективной технологии

К преимуществам перспективной технологии организации движения можно отнести снижение загрузки поездного диспетчера и дежурных по станциям. Сегодня организация движения поездов подобным способом производится в период «окон». Адаптация технологии под нормальные условия перевозочного процесса не производится ввиду опасений по поводу бесконтрольности учета виртуально соединенных поездов и усложнения управления движением поездов в целом.

Основным техническим недостатком технологии «Виртуальная сцепка» на базе системы автоведения является отсутствие возможности автоматического виртуального объединения поездов. Это вынуждает машинистов осуществлять виртуальное соединение и разъединение вручную путем ввода сетевых адресов. Виртуальное соединение не образуется в случаях несвоевременного или ошибочного ручного ввода. Необходимо реализовать автоматическое виртуальное соединение и разъединение поездов, если определен порядок отправления, следования и прибытия поездов в пределах диспетчерского участка.

В настоящее время в ОАО «РЖД» принят план мероприятий по развитию технологии «Виртуальная сцепка» и для устранения выявленных недостатков.

Применение технологии «Виртуальная сцепка» за рубежом. На текущий момент ни одна из зарубежных концепций технологии «Виртуальная сцепка» не была реализована.

Наиболее близкой к практической реализации является «Виртуальная сцепка» на базе системы интервального регулирования ERTMS (European Rail Traffic Management System). Система ERTMS является европейской единой системой интервального регулирования и обеспечения безопасности движения поездов [6], имеющей перечень конфигураций – так называемых функциональных уровней, которым соответствует наличие на участках внедрения определенных типов оборудования. Специфическими чертами системы являются применение путевых бализ (радиомаяков), передача информации на локомотив по цифровому радиоканалу стандарта GSM-R, а также координацию движения поездов через сеть центров радиоблокировки – компьютерных управляющих центров, осуществляющих сбор, обработку ответственной информации, контроль свободности путей и положения поездов на участке, а также передачу управляющих команд как от систем железнодорожной автоматики, так и от оператора. В настоящее время наиболее распространенными являются уровни ERTMS 1 и 2. Третий уровень развития системы – подвижные блок-участки – в настоящее время является наиболее совершенным функциональным уровнем системы ERTMS [7].

Технология «Виртуальная сцепка» в рамках данной концепции представляет собой четвертый функциональный уровень, основным нововведением которого является функция автоматического объединения поездов в группы. Имея в основе техническую базу ERTMS-3, система способна работать в двух режимах – «одиночное следование» и «виртуальная сцепка». При одиночном следовании поезда системой через радиоблок-центры осуществляется непрерывный контроль положения поезда, а также его допустимой скорости в зависимости от положения впередиидущего поезда. Контроль осуществляется посредством непрерывного приема по радиоканалу информации о скорости, местоположении поезда, режиме его следования. В случае сближения поезда с впередиидущим осуществляется корректировка скорости его движения вплоть до остановки.

В случае сближения попутно следующих поездов, если бортовая аппаратура этих поездов имеет техническую возможность к установке прямого радиообмена, центром радиоблокировки осуществляется передача команды на их виртуальное объединение. После получения команды локомотивная аппаратура поездов переходит в режим прямого радиообмена информацией, сохраняя контакт с радиоблок-центром. После виртуального объединения в локомотивную аппаратуру ведомого поезда осуществляется непрерывная передача информации о параметрах и режиме движения впередиидущего поезда, на основе которой локомотивная аппаратура ведомого поезда производит синхронизацию скорости и режима движения с ведущим для выдержки минимального межпоездного интервала. В случае наличия в группе более двух поездов передача информации осуществляется по цепочке.

Центрами радиоблокировки осуществляется непрерывный контроль безопасности движения всех поездов. В случае возникновения потенциально опасных ситуаций, а также в случае невозможности синхронизации режима движения поездов, отставания ведомого поезда от ведущего или приближения группы поездов к раздельному пункту радиоблок-центр передает в локомотивные устройства приказ на разъединение, после чего поезда продолжают движение в режиме одиночного следования. В случае, если разъединение поездов происходит на подходах к станции, такое разъединение называется технологическим, если по техническим причинам или из соображений безопасности – техническим. Сигналы на разъединение и объединение могут быть переданы также оператором вручную.

На примере виртуального объединения пары поездов (поезд А – ведущий, поезд В – ведомый) концептуально система ERTMS работает следующим образом. На первом этапе оба поезда двигаются по перегону в режиме одиночного следования, в этом случае расстояние между поездами учитывает тормозной путь поезда В (L_T), а также резервное расстояние для гарантии безопасности разграничения попутно следующих поездов (L_6). Одиночное следование поездов продолжается до тех пор, пока ведомый поезд не начинает догонять ведущий ($V_A \geq V_B$). В том случае, если поезд В окажется быстрее ведущего ($V_A < V_B$), на расстоянии действия цифровой радиосвязи (L_c) при наличии разрешения от радиоблок-

центра произойдет виртуальное объединение поездов в группу. После виртуального объединения происходит автоматическая синхронизация скорости движения поездов ($V_A = V_B$), при этом удерживается минимально необходимая безопасная дистанция L_6 . Изменение скорости движения поездов в рамках группы также происходит синхронно в соответствии с изменением динамики ведущего поезда ($V'_A = V'_B$).

При отставании поезда В ($V_A > V_B$) происходит увеличение расстояния между поездами. Если расстояние между поездами выйдет за пределы действия цифровой радиосвязи ($\Delta L > L_c$), то произойдет автоматическое разъединение группы поездов (техническое разъединение). В тех случаях, когда возникает необходимость приема ведущего поезда группы на приемоотправочные пути станции, системой реализуется процедура технологического разъединения группы поездов. Происходит замедление ведомого поезда В относительно ведущего поезда А ($V_A > V'_B$) для увеличения расстояния между поездами. Расстояние между поездами должно обеспечивать тормозной путь поезда В (L_T), дистанцию безопасного разграничения (L_6), а также резервное расстояние, необходимое для приведения стрелочного перевода в положение для движения по главному пути после приема ведущего поезда по отклонению (L_n). Дальнейшее движение поезда В осуществляется в режиме одиночного следования до момента нагона им другого впередиидущего поезда.

Алгоритм работы «Виртуальной сцепки» на базе системы ERTMS представлен на рисунке 5.

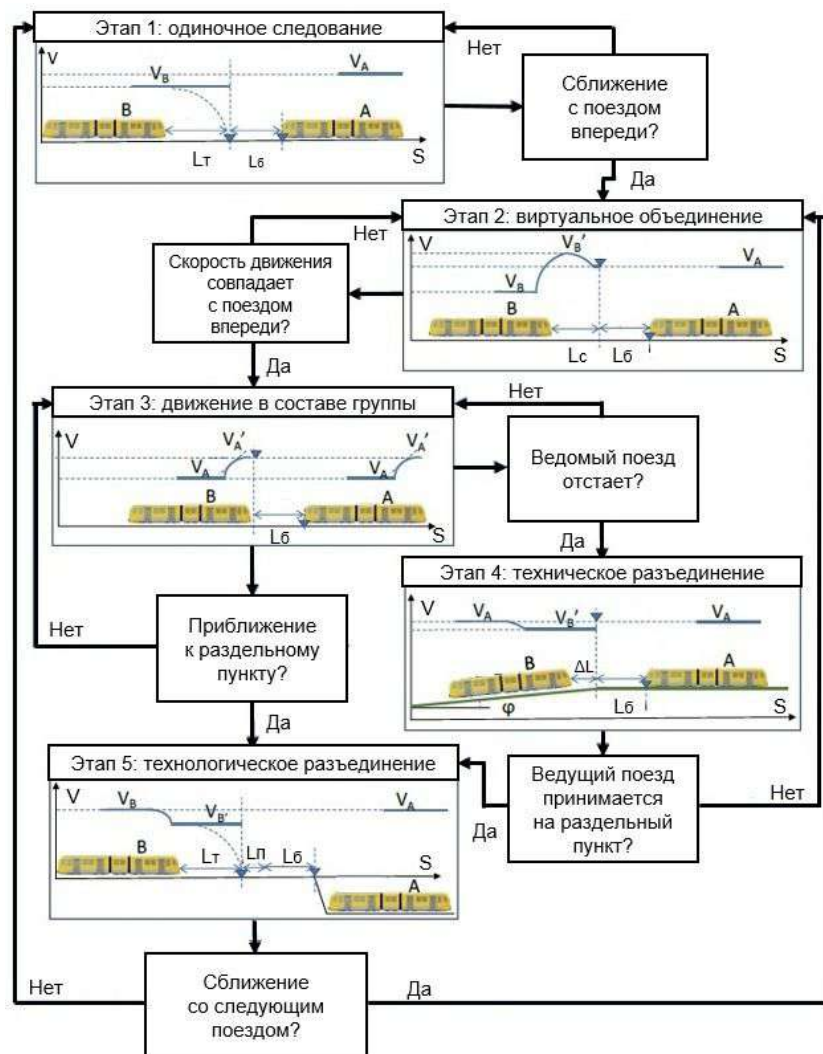


Рисунок 5 – Алгоритм работы технологии «Виртуальная сцепка» на базе системы ERTMS. L_T – тормозной путь; L_6 – дистанция безопасного разграничения поездов; L_c – дистанция виртуального соединения поездов; L_n – дистанция безопасного перевода стрелки [8, 9]

Идея описанной выше системы в перспективе позволяет в автоматическом режиме формировать и переформировывать связки из двух и более попутно следующих поездов, однако сейчас система находится в стадии проектирования. Основным фактором, сдерживающим реализацию централизованной «Виртуальной сцепки», – отсутствие в настоящее время участков, оборудованных системой ERTMS-3.

Технология «Виртуальная сцепка» имеет значительный потенциал и перспективы применения на железнодорожных магистралях с интенсивным движением поездов, как смешанным, так и специализированным, в том числе и как задел для реализации беспилотных технологий [10]. Вместе с тем накопленный в ходе эксплуатации опыт свидетельствует о необходимости совершенствования системы как в технической части, так и в технологии применения. Для совершенствования реализованной на Восточном полигоне технологии «Виртуальная сцепка» предлагается осуществить следующее.

1. Доработать систему ИСАВП-РТ-М в части автоматического виртуального объединения поездов, что позволит избежать некорректной работы локомотивной аппаратуры, вызванной неправильным вводом информации. Автоматическое объединение поездов помимо повышения надежности позволит снизить нагрузку на диспетчерский персонал ввиду отсутствия необходимости контроля занятости сетевых адресов.

2. Усовершенствовать оборудование цифровой радиосвязи для обеспечения возможности виртуального объединения поездов в группы из трех и более поездов, что позволит усилить эффект от применения технологии.

3. Изменить технологию формирования и пропуска виртуально соединенных поездов по участку, исключив необходимость в регистрируемом приказе поездного диспетчера. Изменение технологии обеспечит более широкое применение технологии «Виртуальная сцепка» и позволит более рационально распределить нагрузку на диспетчерский персонал.

Решение описанных выше технических и технологических вопросов позволит нивелировать существующие проблемы при использовании технологии «Виртуальной сцепки», повысит ее удобство, что в конечном счете позволит значительно повысить безопасность движения и пропускную способность [11] существующих и будущих участков внедрения.

Список литературы

1. Голочалов, Н. С. Повышение пропускной способности железных дорог за счет совершенствования работы устройств автоматики и телемеханики : специальность 2.9.4 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Голочалов Николай Сергеевич; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург, 2023. – 183 с. – Текст : непосредственный.

2. Взаимодействие двух систем интервального регулирования «виртуальная сцепка» и АЛСО с ПБУ на сети ОАО «РЖД» / Е. Н. Розенберг, А. П. Козловский, М. А. Дежков, А. А. Суслов. – Текст : непосредственный // Наука и технологии железных дорог. – 2023. – № 2 (26). – С. 4–5.

3. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии «Виртуальная сцепка» / Н. П. Асташков, В. А. Оленцевич, Ю. И. Белоголов, В. В. Кашковский. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3 (67). – С. 173–180.

4. Технологический процесс организации движения поездов с использованием технологии интервального регулирования «Виртуальная сцепка» на участках Мариинск – Тайшет – Карымская – Хабаровск II – Находка-Восточная и Междуреченск – Тайшет – Таксимо Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог. – Москва : ОАО «РЖД», 2023. – 42 с. – Текст : непосредственный.

5. Методика расчета рациональных границ диспетчерских участков. – Москва : Нормативно-исследовательская станция по труду хозяйства перевозок ПВЦ МПС России, 2002. – 44 с. – Текст : непосредственный.
6. Современные системы управления движением поездов : отечественный и зарубежный опыт / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, А. В. Озеров, В. М. Малинов. – Екатеринбург : Издательские решения, 2020. – 210 с. – Текст : непосредственный.
7. Flammioni F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards railway virtual coupling. *ESARS-ITEC Europe 2018 – 5th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) and International Transportation Electrification Conference (ITEC)*. Nottingham, UK, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8607523> (accessed 08.10.2023).
8. Quaglietta E., Wang M., Goverde R. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations. *Journal of rail transport planning & management*, 2020, no. 15, pp. 100195.
9. Quaglietta E., Goverde R. M. P. Exploring virtual coupling : operational principles and analysis. *Proceedings of the 10th ASPECT Conference of the Institution of railway signalling engineers*. Delft, Delft University of Technology, 2019. Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5f6e3050-3050-4bfd-a3e1-5f0aa02210e0> (accessed: 06.10.2023).
10. Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2022. – № 4 (8). – С. 377–388.
11. Климова, Е. Е. Технология виртуальной сцепки поездов как инструмент повышения пропускной и провозной способности линии / Е. Е. Климова, Л. Е. Пилинушка, В. С. Рябов. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Международной научно-практической конференции / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2019. – С. 60–64.

References

1. Golochalov N.S. *Povyshenie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog za schet sovershenstvovaniia raboty ustroystv avtomatiki i telemekhaniki* (Increasing the throughput capacity of railways through the improvement of automation and telemechanics systems). Doctor's thesis, Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport, 2023, 183 p. (In Russian).
2. Rozenberg E.N., Kozlovskii A.P., Dezhkov M.A., Suslov A.A. Interaction of two systems: interval regulation «virtual coupling» and automatic locomotive signaling with movable block sections on the Russian Railways network. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog – Railway Science and Technology*, 2023, no. 2 (26), pp. 4-5 (In Russian).
3. Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Belogolov Yu.I., Kashkovskii V.V. Evaluation of the compatibility of the traction power supply system during implementation of train traffic separation using the «virtual coupling» technology. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2020, no. 3 (67), pp. 173-180 (In Russian).
4. The technological process of organizing train movement using the interval control technology «Virtual Coupling» on sections Mariinsk – Taishet – Karymskaia – Khabarovsk II – Nakhodka-Vostochnaia and Mezhdurechensk – Taishet – Taksim of the Krasnoyarsk, East Siberian, Trans-Baikal, and Far Eastern railways. Moscow, JSC «RZD» Publ, 2023, 42 p. (In Russian).
5. *Metodika rascheta ratsional'nykh granits dispetcherskikh uchastkov* [The methodology for calculating the rational boundaries of dispatch areas]. Moscow, Normative research station for transport economy labor project implementation center Ministry of Transport and Communications Publ., 2002, 44 p. (In Russian).

6. Rozenberg E.N., Shukhina E.E., Ozerov A.V., Malinov V.M. *Sovremennye sistemy upravleniia dvizheniem poezdov: otechestvennyi i zarubezhnyi opyt* [Modern train traffic control systems: domestic and international experience]. Ekaterinburg, Publishing solutions Publ., 2020, 210 p. (In Russian).

7. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards railway virtual coupling. *ESARS-ITEC Europe 2018 – 5th International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS) and International Transportation Electrification Conference (ITEC)*. Nottingham, UK, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8607523> (accessed 08.10.2023).

8. Quaglietta E., Wang M., Goverde R. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations. *Journal of rail transport planning & management*, 2020, no. 15, pp. 100195.

9. Quaglietta E., Goverde R. M. P. Exploring virtual coupling : operational principles and analysis. *Proceedings of the 10th ASPECT Conference of the Institution of railway signalling engineers*. Delft, Delft University of Technology, 2019. Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:5f6e3050-3050-4bfd-a3e1-5f0aa02210e0> (accessed: 06.10.2023).

10. Baranov L.A., Bestemyanov P.F., Balakina E.P., Pudovikov O.E. Design principles and models of automatic control system for second locomotive at virtual assessment. *Avtomatika na transporte – Transport automation research*, 2022, no. 4 (8), pp. 377-388 (In Russian).

11. Klimova E.E., Pilinushka L.E., Ryabov V.S. [The technology of virtual train coupling as a tool to increase the throughput and carrying capacity of the line]. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona: materialy desyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the tenth International scientific and practical conference]. Irkutsk, 2019, pp. 60-64 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Осипов Александр Петрович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

Образцова ул., д. 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (910) 439-97-55.

E-mail: traimans@mail.ru

Медведев Дмитрий Андреевич

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

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

Аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (915) 067-56-04.

E-mail: medwedew00@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осипов, А. П. Виртуальная сцепка. Подходы и реализация / А. П. Осипов, Д. А. Медведев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 53 – 63.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Osipov Aleksander Petrovich

Russian University of Transport RUT (MIIT).

9-9, Obrazcova st., 127055, Moscow, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Transport operations and safety management», RUT (MIIT).

Phone: +7 (910) 439-97-55.

E-mail: traimans@mail.ru

Medvedev Dmitriy Andreevich

Russian University of Transport RUT (MIIT).

9-9, Obrazcova st., 127055, Moscow, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Electric trains and locomotives», RUT (MIIT).

Phone: +7 (915) 067-56-04.

E-mail: medwedew00@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Osipov A.P., Medvedev D.A. Virtual coupling. Approaches and realization. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 53-63 (In Russian).

В. Г. Пищик

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ), г. Гомель, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТЕЛЛАЖНОГО ХРАНЕНИЯ ПРИ ЗОННОМ СЕКЦИОНИРОВАНИИ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

Аннотация. Настоящее исследование посвящено усовершенствованию технологии хранения контейнеров. Целью данного исследования является исключение излишней перестановки контейнеров путем разработки нестандартных технических и технологических методов хранения контейнеров, позволяющих осуществлять их забор с любого места хранения. В качестве возможного решения предлагается применение технологии многоярусного стеллажного хранения контейнеров, аналогичной испытываемой на терминале «BOXBAY High Bay Store». Для рассмотрения возможности применения стеллажной системы хранения на терминале типа «сухой порт» в статье были рассмотрены следующие вопросы: секционирование терминала на зоны хранения, технология постановки контейнеров в стеллаж (снятие, перестановка контейнеров между ячейками), порядок расстановки контейнеров, техническая организация стеллажного хранения, требуемые транспортно-перегрузочные механизмы, необходимые для осуществления постановки, снятия, перемещения контейнеров до стеллажа, от стеллажа и между ячейками. Анализ предложенного решения показал, что технология стеллажного хранения может быть использована на терминале типа «сухой порт», но с существенными отличиями от терминала «BOXBAY» в связи с разностью в приоритетности поставленных задач при морской и железнодорожных перевозках. В результате выполнения работы предложены альтернативные варианты стеллажного хранения при мультимодальной перевозке железнодорожным и автомобильным транспортом. Предложенные варианты стеллажного хранения способствуют повышению эффективности терминальной обработки за счет исключения излишних транспортно-перегрузочных операций, сокращения времени и расходов на работу транспортно-перегрузочных механизмов, повышения адаптивности терминальной системы хранения, которая позволит одновременно хранить контейнеры разных типов и размеров, контейнеры открытого типа, съемные автомобильные кузова, пакетные грузы в стеллажных ячейках.

Ключевые слова: стеллажная система хранения, контейнеры, терминальная обработка, зонирование терминала, терминал типа «сухой порт».

Vladislav G. Pishchic

Belarusian State University of Transport (BSUT), Gomel, Republic of Belarus

APPLICATION OF HIGH-BAY CONTAINER WAREHOUSE TECHNOLOGY FOR ZONE PARTITIONING OF A CONTAINER TERMINAL

Abstract. The present study is devoted to the improvement of container storage technology. The aim is to eliminate unnecessary rearrangement of containers by developing non-standard technical and technological methods of container storage, allowing them to be collected from any place of storage. As a possible solution, it is proposed to use the technology of multi-tiered shelving storage of containers, similar to the one tested at the BOXBAY High Bay Store terminal. To consider the possibility of using a shelving storage system at a dry port terminal, the following issues were considered in the article: partitioning the terminal into storage areas, the technology of placing containers in a rack (removing, rearranging containers between cells), the order of container placement, the technical organization of shelving storage, the required transport and transshipment mechanisms necessary for the installation, removing, moving containers to the rack, from the rack and between cells. The analysis of the proposed solution showed that the technology of shelving storage can be used at a dry port terminal, but with significant differences from the BOXBAY terminal, due to the difference in the priority of tasks set during sea and rail transportation. As a result of the work, alternative shelving storage options are proposed for multimodal transportation of rail and road transport. The proposed shelving storage options contribute to increasing the efficiency of terminal processing, by eliminating unnecessary transport and transshipment operations, reducing the time and cost of operating transport and transshipment mechanisms, increasing the adaptability of the terminal storage system, which will simultaneously store containers of different types and sizes, open containers, removable car bodies, package loads in shelving cells.

Keywords: high-bay container warehouse, containers, terminal processing, terminal zoning, dry port type terminal.

Зонирование транспортных терминалов является одним из способов повышения эффективности терминальной обработки контейнеров. Современные авторы предлагают

зонное секционирование терминалов по ряду технологических признаков: по виду технологической фазы транспортировки, по признакам состояния, принадлежности.

В предыдущих исследованиях [1] было предложено секционирование контейнерного терминала по трем зонам в зависимости степени надежности прогнозирования технологической цепочки обработки. Описанная технология предполагает автоматическое распределение контейнеров по зонам хранения до их поступления на терминал, реализацию технологии обработки, основанную на модели теории массового обслуживания «LIFO».

Контейнеры с высоким уровнем надежности прогнозирования предлагается секционировать в зону «А», со средним – в зону «Б», с низким – в зону «В». Для зон хранения контейнеров «Б» и «В» предлагается нестандартный технологический и технический метод хранения, позволяющий забор контейнера с любого места его хранения. Такой метод предусматривает повышение эффективности терминальной обработки путем исключения появления блокирующих контейнеров, сокращения транспортно-перегрузочных операций.

В статье В. И. Тиверовского [2] приведены примеры принципиально новых транспортно-складских систем и складов с высокой степенью автоматизации, отмечены новые цифровые технологии в складской логистике за рубежом. Упомянуто о строительстве первого в мире высокостеллажного склада для контейнеров. Ioanna O Alexandri и соавторы [3] произвели анализ эффективности стеллажной системы хранения на терминале «BOXBAY». В статье данный проект рассматривается как способ повышения эффективности терминальной обработки в сравнении с современными системами хранения контейнеров. Автоматизированное распределение товаров по технологии стеллажного хранения рассмотрено в статье F. Berns [4]. Выполнение процесса основано на производственных данных крупного датского склада. Подобного рода автоматизированное распределение можно применить и для создания новой технологии хранения контейнеров.

На основании приведенного зарубежного опыта предлагается создание системы стеллажного хранения контейнеров для зон «Б» и «В» на терминале типа «сухой порт». Стеллажная система хранения контейнеров представляет собой комплекс совмещенных специализированных стеллажей, предназначенных для организации и хранения различных видов и типов контейнеров. Стеллаж состоит из последовательно-параллельных ячеек (в зависимости от типа схемы), расположенных в несколько ярусов на необходимую высоту. Такая система является одним из эффективных способов хранения и позволяет забор контейнеров с любого места. Многоярусная система хранения – не принципиально новая технология, а скорее адаптация существующих технологий для автоматизированной терминальной обработки контейнеров.

В большинстве случаев технология стеллажного хранения контейнеров применяется для хранения тарно-упаковочных грузов, где доказала свою эффективность и экономическую целесообразность. В области терминальной обработки контейнеров стеллажная система хранения применялась только на испытаниях, но на практике стеллажного контейнерного терминала еще нет.

Компания DP World провела испытание многоэтажной высокоавтоматизированной стеллажной системы размещения на терминале. Испытания проводились в порту Джебель Али в Дубае на терминале «BOXBAY High Bay Store» (рисунок 1) [5]. Испытываемая стеллажная система предполагает 11 уровней хранения контейнеров, что позволяет, по мнению создателей, более чем на 60 % увеличить емкость хранения контейнерной площадки. Перемещение контейнеров осуществляется при помощи полностью электрифицированных и автоматизированных транспортно-перегрузочных механизмов. Применение стеллажной системы хранения помогает повысить скорость обработки, энергоэффективность, безопасность хранения и значительно снизить эксплуатационные расходы.



Рисунок 1 – Контейнерный терминал «BOXBAY High Bay Store»

Среди преимуществ стеллажной системы контейнеров можно выделить следующие:

- сокращение транспортно-перегрузочных операций за счет отсутствия излишних перестановок контейнеров (решение проблемы с блокирующими контейнерами);
- сокращение затрат на излишние транспортно-перегрузочные операции;
- повышение уровня автоматизации на терминале;
- возможность хранения контейнеров разных типов и размеров в любой из стеллажных ячеек (в пределах максимального размера);
- меньшая требуемая площадь терминала в отличие от стандартной, связанная с высотой конструкции и уменьшением проезда между стеллажами.

Недостатки стеллажной системы хранения:

- затраты на создание конструкций терминального стеллажа и его обслуживание;
- возможное уменьшение уровня противопожарной безопасности за счет сокращения расстояния между контейнерами;
- пониженная устойчивость конструкции к ветровым нагрузкам;
- меньшая адаптивность в изменении зон хранения терминала.

Технология обработки при стеллажной системе хранения грузеных контейнеров, прибывших под выдачу на автотранспорт на терминале «BOXBAY», представлена на рисунке 2.

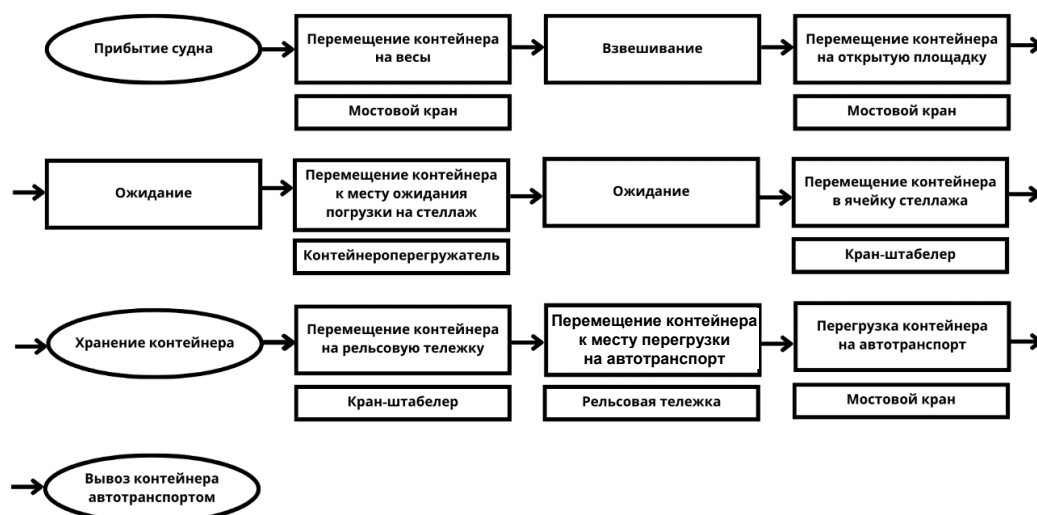


Рисунок 2 – Технология обработки контейнера при стеллажной системе хранения на терминале «BOXBAY»

Стеллажная система хранения, применяемая на терминале «ВОХВАУ», больше подходит для морских терминалов, которые имеют отличительные особенности по сравнению с терминалами типа «сухой порт» [6]. Одной из таких особенностей является наличие избыточного количества транспортно-перегрузочных механизмов на морском терминале, что является нецелесообразным для железнодорожного транспорта. Исходя из технологии обработки на терминале «ВОХВАУ» (см. рисунок 2) можно отметить, что в терминальной обработке контейнеров участвуют пять транспортно-перегрузочных механизмов. Наличие большого числа механизмов на терминале типа «сухой порт» может привести к увеличению затрат на терминале, что не допускает применения технологии стеллажной системы хранения по примеру терминала «ВОХВАУ» в первоначальном ее варианте.

Для терминалов типа «сухой порт» предлагается применение стеллажной системы хранения с существенными отличиями от терминала «ВОХВАУ». На этапе проектирования стеллажной системы хранения контейнеров необходимо рассчитать требуемое количество стеллажных ячеек в зависимости от структуры контейнеропотока, требуемых транспортно-перегрузочных механизмов. Данная задача должна быть решена превентивно до закупки терминального оборудования и транспортно-перегрузочных механизмов с адаптацией под технологию работы терминала. В зависимости от операций на терминале и пропорции между контейнерами разных групп (А, Б, В) производится зонное секционирование терминала по площади.

Для терминалов типа «сухой порт» площадь одной стеллажной ячейки должна предусматривать размещение двух двадцатифутовых контейнеров максимального размера по высоте или одного сорокафутового контейнера максимального размера по высоте. Хранение двух контейнеров в одной ячейке позволит сделать стеллажную систему более универсальной и адаптивной к разным типам и размерам контейнеров. Предложенная система является отличной от терминала «ВОХВАУ», где предусмотрена возможность хранения только одного контейнера в одной ячейке.

В проектируемой стеллажной ячейке должна быть предусмотрена сплошная или решетчатая нижняя опорная поверхность, которая позволит увеличить адаптивность применения стеллажной системы путем возможности хранения в одной ячейке:

- съемных автомобильных кузовов, которые перевозятся по контейнерной технологии (кузова данного типа обладают меньшей прочностью, в связи с этим их нельзя штабелировать при обычном методе хранения на терминалах);
- пакетных грузов при наличии свободных ячеек;
- открытых контейнеров с грузом, не выходящим за габариты стеллажной ячейки.

На терминале «ВОХВАУ» нижней опорной поверхностью являются боковые уступы, которые не позволяют хранение перечисленных выше средств транспортировки. Для защиты от атмосферных осадков (дождя, снега) на верхнем ярусе стеллажной системы хранения необходимо предусмотреть сплошную поверхность.

Рефрижераторные контейнеры могут быть выделены в отдельную зону с использованием стеллажной системы хранения с внешним подключением энергопитания, что позволит избежать перестановки рефрижераторных контейнеров и отключения их от внешнего питания в этот момент. В рефрижераторных зонах стеллажного типа могут храниться контейнеры вне зависимости от группы, выделенной по степени надежности прогнозирования технологической цепочки.

На терминале типа «сухой порт» предлагается применение стеллажной системы хранения по нескольким вариантам.

1. Проектирование стеллажной системы хранения в три яруса по высоте, в две полосы по ширине и длиной N мест хранения для контейнеров (ограниченное по пожарным требованиям).

Распределение контейнеров по ярусам предлагается в зависимости от массы брутто контейнера. Каждая ячейка стеллажа должна обладать максимальной грузоподъемностью с

расчетом размещения двух двадцатифутовых контейнеров (ориентировочно от 65 т). Для облегчения конструкции при проектировании терминала предусматривается, что на верхнем ярусе осуществляется хранение только порожних контейнеров. За счет снижения требуемой нагрузки на верхний ярус можно облегчить конструкцию стеллажной системы, сделав ее более экономически выгодной при строительстве и содержании.

Минимальное расстояние между параллельно стоящими стеллажами (технологический проезд) при применении транспортно-перегрузочных механизмов должно обеспечивать требуемую ширину пожарного проезда и технологическую ширину, обусловленную спецификой обработки контейнеров. Из двух представленных показателей выбирается больший для обеспечения безопасного перемещения транспортно-погрузочных механизмов.

Принципиальная схема стеллажной системы хранения по первому варианту представлена на рисунке 3.

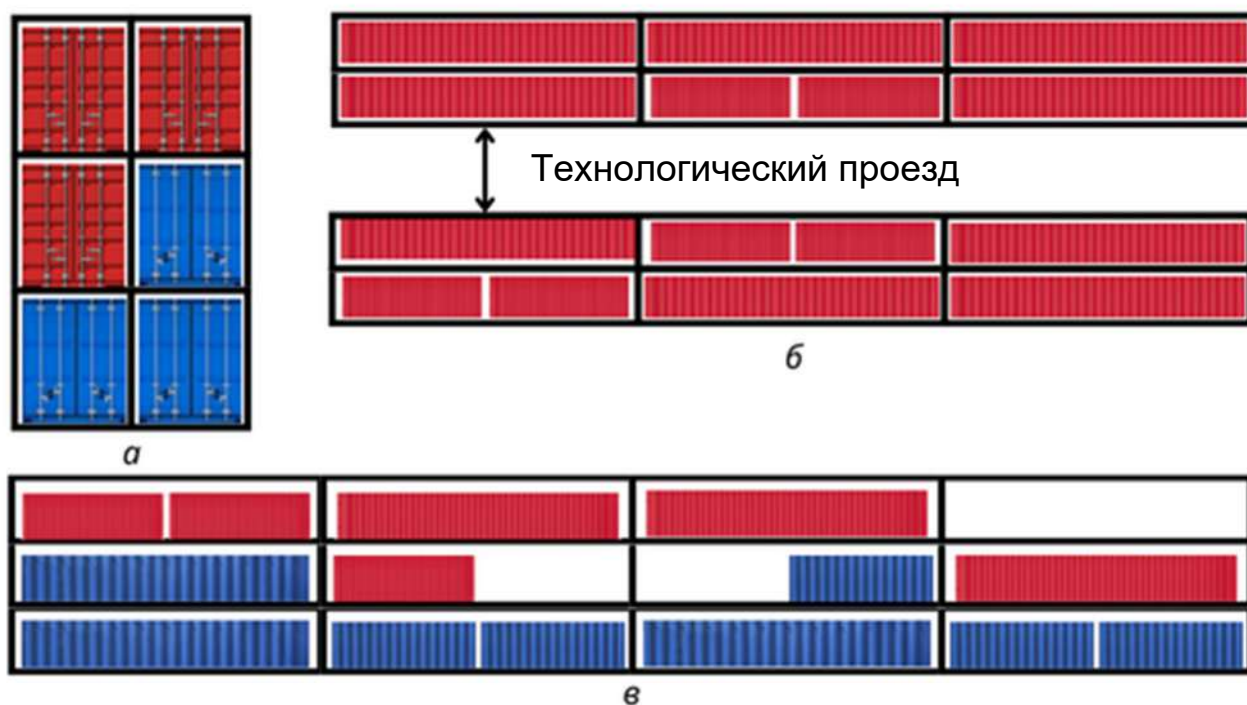


Рисунок 3 – Принципиальная схема стеллажной системы хранения:
а – вид с торца; б – вид сверху; в – вид сбоку

Транспортно-перегрузочные механизмы при трехъярусной системе стеллажного хранения должны удовлетворять следующим требованиям: высота подъема грузозахватного устройства должна составлять не менее 6,3 м, грузоподъемность – не менее 30 т. К транспортно-перегрузочным механизмам, удовлетворяющим всем необходимым требованиям, относятся погрузчики с ротационным устройством.

Применение погрузчиков с ротационным устройством является целесообразным при трехъярусной системе хранения в связи с ограниченной высотой подъема. Одним из подходящих вариантов погрузчиков является модель HELI CPCD 300, технические характеристики которой представлены в таблице [7].

Технические характеристики дизельного погрузчика HELI CPCD 300

Характеристика	Значение
Грузоподъемность, кг	30000
Высота подъема на вилах, мм	6500
Длина машины с вилами, мм	9200
Ширина машины с вилами, мм	3450

Управление процессами перевозок

Технология обработки при стеллажной системе хранения грузеных контейнеров, прибывших под выдачу на автотранспорт на терминале по первому варианту, представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Технология обработки контейнера при стеллажной системе хранения по первому варианту

2. Проектирование стеллажного терминала при большом объеме переработки контейнеров предлагается в М ярусов (в зависимости от потребности), в две полосы по ширине и длиной N мест хранения для контейнеров по принципу терминала «ВОХВАУ» с отличительными особенностями.

Для такой системы стеллажного хранения необходимо предусмотреть симбиоз транспортно-перегрузочных механизмов с учетом максимальной автоматизации их работы. Транспортно-перегрузочным механизмом, осуществляющим непосредственно работу со стеллажами, является кран-штабелер с прикрепленным специальным устройством, захватывающим стандартизованную многооборотную тару. Такое устройство применяется на терминале «ВОХВАУ». При использовании этого механизма необходимо учитывать, что на каждый пролет стеллажной системы хранения необходимо одно такое устройство. Для сокращения числа транспортно-перегрузочных механизмов наиболее целесообразно использовать такую систему с одним пролетом и одной полосой по ширине с максимальной потребной и допустимой высотой (рисунок 5).



Рисунок 5 – Стеллажная система хранения при применении транспортно-перегрузочного крана-штабелера – боковое расположение контейнеров (вид сверху)

3. Наиболее целесообразным вариантом стеллажной системы хранения представляется размещение контейнеров с торцевой стороны при проектировании одного пролета и одной полосы по ширине. Такая система позволит расположить наибольшее количество контейнеров на стеллаже при использовании одного пролета. Недостатком такой системы является возможность расположения только одного контейнера в стеллажной ячейке вне зависимости от его типа и размера. Однако такая система позволит одним транспортно-перегрузочным механизмом обслуживать всю стеллажную систему хранения. Для большей адаптивности стеллажной системы хранения предлагается несколько вариантов при торцевом расположении контейнеров: 1) разделение стеллажной системы хранения на две зоны с двадцатифутовыми и сорокафутовыми контейнерами в зависимости от потребности (рисунок 6, а). Такой вариант позволит более рационально распределить площадь контейнерного терминала; 2) применение максимально необходимого размера ячейки, которая является адаптивной для двадцатифутового и сорокафутового контейнеров одновременно (рисунок 6, б).

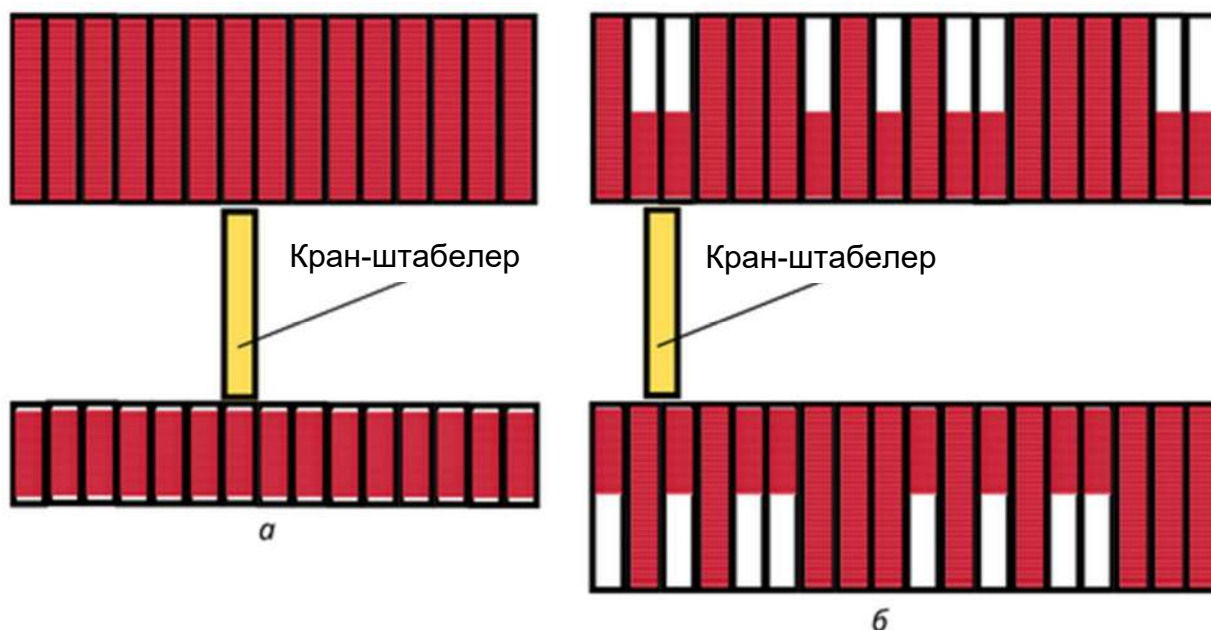


Рисунок 6 – Стеллажная система хранения при применении транспортно-перегрузочного крана-штабелера – торцевое расположение контейнеров

Технология обработки при стеллажной системе хранения грузеных контейнеров, прибывших под выдачу на автотранспорт на терминале по второму и третьему вариантам, представлена на рисунке 7.

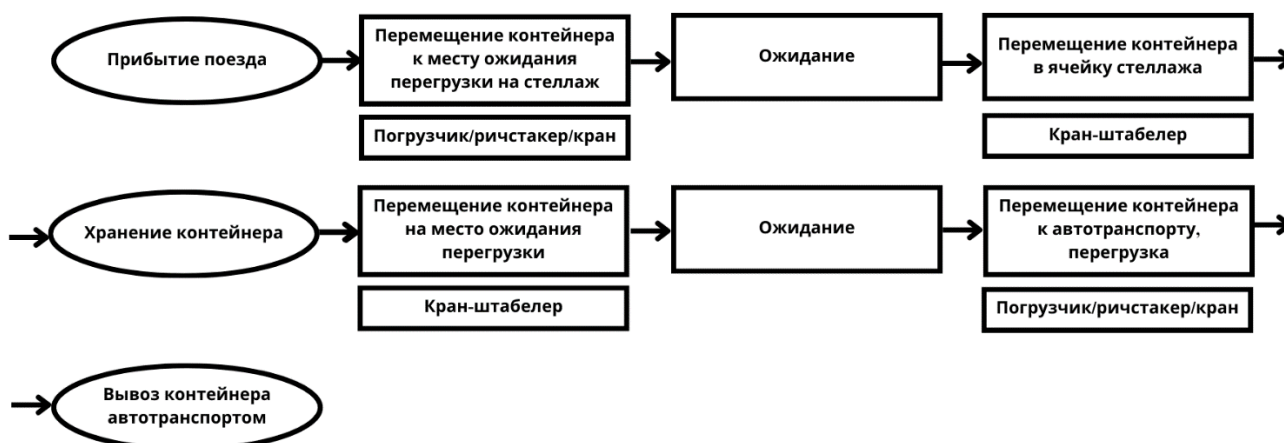


Рисунок 7 – Технология обработки контейнера при стеллажной системе хранения по второму и третьему вариантам

Предложенные варианты стеллажного хранения могут быть реализованы на современных терминалах типа «сухой порт» с применением доступных транспортно-перегрузочных механизмов. Одним из крупнейших транспортных терминалов типа «сухой порт» в Республике Беларусь является терминал Колядичи с двумя контейнерными площадками общей вместимостью 2700 контейнеров и среднесуточной перерабатывающей способностью 184 вагона [8]. Годовая перерабатывающая способность станции составляет 57000 контейнеров.

Терминал оснащен двумя ричстакерами итальянской фирмы Ferrari F477 с грузоподъемностью 45 т каждый и одним козловым краном KOKS KRAN-55 с грузоподъемностью 55 т. На терминале предусмотрена отдельная площадка для хранения рефрижераторных контейнеров с возможностью подключения к энергопитанию до 27 контейнеров одновременно.

Существующие технологии на терминале Колядичи позволяют рассмотреть применение стеллажной системы хранения по второму и третьему вариантам, предложенным выше. Транспортно-перегрузочные механизмы, применяемые на терминале, можно адаптировать под стеллажную систему хранения. Ричстакеры и кран могут быть использованы для перемещения контейнеров к месту ожидания перегрузки на стеллаж, погрузки на автомобильный и железнодорожный транспорт. Отдельной зоной можно предусмотреть строительство стеллажной рефрижераторной системы хранения с возможностью подключения к энергопитанию. Стеллажная система позволит осуществлять перестановку, съем контейнеров без отключения от энергопитания неавтономных рефрижераторных контейнеров, находящихся в верхних ярусах. Применение стеллажной системы хранения на этом терминале позволит увеличить вместимость транспортного терминала при сохранении его площади, сократить излишние транспортно-перегрузочные операции, создаст предпосылки к ускорению обработки и минимизации затрат на ее выполнение.

В современных отечественных и зарубежных литературных источниках в недостаточной мере рассмотрен вопрос применения перспективной технологии стеллажного хранения контейнеров. Стеллажная система хранения является одной из технологий повышения эффективности терминальной обработки за счет исключения излишних транспортно-перегрузочных операций, сокращения времени и расходов на работу транспортно-перегрузочных механизмов, повышения адаптивности терминальной системы хранения, которая позволит одновременно хранить контейнеры разных типов и размеров, контейнеры открытого типа (при незначительных выступах груза в пределах стеллажной ячейки), съемные автомобильные кузова, пакетные грузы в стеллажных ячейках.

Список литературы

1. Пищик, В. Г. Теоретическое обоснование зонирования контейнерного терминала по степени надежности прогнозирования технологической цепочки обработки контейнеропотока / В. Г. Пищик. – Текст : непосредственный // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2023. – № 1 (5). – С. 157–165.
2. Тиверовский, В. И. Автоматизация складов и логистических центров за рубежом / В. И. Тиверовский. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 2. – С. 32–37.
3. Alexandri I.O., Yuan M., Zhou C. and Xue L. Efficiency Analysis of a High-bay Container Storage System – *BoxBay, 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Mexico City, Mexico, 2022, pp. 1588-1594, doi: 10.1109/CASE49997.2022.9926678.
4. Berns F., Ramsdorf T., Beecks Ch. Machine Learning for Storage Location Prediction in Industrial High Bay Warehouses. *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges*, Virtual Event, January 10 – 15, 2021, Proceedings, Part IV, pp. 650-661.
5. Introducing *Boxbay* // *dpworld.com* : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dpworld.com/smart-trade/boxbay> (дата обращения: 15.11.2023).
6. Янченко, А. А. Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, И. Н. Вольнов. – Текст : непосредственный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 704–713, DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.
7. Дизельный погрузчик HELI CPCD300, 30,0 т // *heli.com.ru* : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://heli.com.ru/pogruzchiki/avtopogruzchiki-heli/dizelnie-pogruzchiki/cpcd300.html> (дата обращения: 15.11.2023).
8. Терминал Колядичи // *belint.by* : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://belint.by/services/terminal/terminal-koladici?ysclid=lp9njcvpf9657262402> (дата обращения: 15.11.2023).

References

1. Pishchic V.G. Theoretical foundation of container terminal zoning according to the degree of reliability of forecasting the technological processing chain of container flow. *Problemy perspektivnogo razvitiia zheleznodorozhnykh stantsii i uzlov – Problems of railway stations and junctions perspective development*, 2023, no. 1 (5), pp. 157-165 (In Russian).
2. Tiverovsky V.I. Automation of warehouses and logistics centers abroad. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2022, no. 2, pp. 32-37 (In Russian).
3. Alexandri I.O., Yuan M., Zhou C. and Xue L. Efficiency Analysis of a High-bay Container Storage System – BoxBay, 2022 *IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Mexico City, Mexico, 2022, pp. 1588-1594, doi: 10.1109/CASE49997.2022.9926678.
4. Berns F., Ramsdorf T., Beecks Ch. Machine Learning for Storage Location Prediction in Industrial High Bay Warehouses. *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges*, Virtual Event, January 10 – 15, 2021, Proceedings, Part IV, pp. 650-661.
5. Introducing Boxbay. Available at: <https://www.dpworld.com/smart-trade/boxbay> (accessed 15.11.2023).
6. Yanchenko A.A., Malikova T.E., Volnov I.N. Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova – Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*, 2017, no. 4, pp. 704-713, DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713 (In Russian).
7. Dizel'nyi pogruzchik HELI CPCD300, 30,0 t [HELI CPCD 300 diesel loader, 30.0 t]. Available at: <https://heli.com.ru/pogruzchiki/avtopogruzchiki-heli/dizelnie-pogruzchiki/cpcd300.html> (accessed 15.11.2023).
8. Terminal Koliadichi [Kolyadichi Terminal]. Available at: <https://belint.by/services/terminal/terminal-koladichi?ysclid=lp9njcvpf9657262402> (accessed 15.11.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пищик Владислав Геннадьевич

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246022, Республика Беларусь.

Аспирант, преподаватель-стажер кафедры «Управление грузовой и коммерческой работой», БелГУТ.

Тел.: +375299059607.

E-mail: uladzislau.pishchic@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пищик, В. Г. Применение технологии стеллажного хранения при зонном секционировании контейнерного терминала / В. Г. Пищик. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 64 – 72.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pishchic Vladislav Gennadievich

Belarusian State University of Transport (BSUT).

Kirova st., 34, Gomel, 246022, Republic of Belarus.

Postgraduate student, trainee teacher of the Department of Cargo and Commercial Work Management, BSUT.

Phone: +375299059607.

E-mail: uladzislau.pishchic@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pishchic V.G. Application of high-bay container warehouse technology for zone partitioning of a container terminal. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 64-72 (In Russian).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕЕЗДНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Аннотация. В статье рассматривается возможность уменьшения времени нахождения переезда в закрытом состоянии при безусловном обеспечении безопасности. Актуальность рассматриваемого вопроса определяется наличием на сети железных дорог России большого числа переездов, оборудованных устройствами автоматической переездной сигнализации (АПС). При этом время извещения о приближении поезда к переезду определяется без учета фактических параметров движения поезда. В связи с этим с целью обеспечения безопасности расчет времени извещения о приближении поезда к переезду определяется исходя из максимальной установленной на данном участке железной дороги скорости движения поезда, что в большинстве случаев приводит к избыточному времени простоя автомобильного транспорта у закрытого переезда. Рассмотрена возможность решения поставленной задачи за счет определения координаты поезда на участке извещения, а следовательно, и фактических параметров его движения, путем измерения входного сопротивления рельсовой линии. Предлагается использовать алгоритмы машинного обучения с возможностью коррекции результатов определения координаты поезда. Для диверсификации аппаратных и программных средств, используемых данными алгоритмами, рассмотрена возможность организации второго параллельного канала определения входного сопротивления рельсовой линии за счет применения математического аппарата конформных отображений. Приведены расчеты, позволяющие определять координату поезда на участке извещения к переезду путем конформного отображения области выходных сопротивлений рельсового четырехполюсника на область его входных сопротивлений. Показана принципиальная возможность определения с достаточно высокой точностью как факта вступления поезда на участок извещения, так и координаты поезда. Предложенные решения, по мнению авторов, позволят увеличить эффективность работы устройств автоматической переездной сигнализации за счет определения времени извещения на переезд о приближении поезда с учетом фактических параметров его движения.

Ключевые слова: извещение на переезд, сопротивление изоляции рельсовой линии, входное сопротивление рельсовой линии, конформное отображение, комплексная плоскость, коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии.

Sergey A. Lunev¹, Sergey V. Grishechko², Maxim V. Klyuchnikov²

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation;

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

INCREASING THE AUTOMATIC LEVEL CROSSINGS SIGNALLING PERFORMANCE EFFICIENCY

Abstract. The article considers the possibility to reduce the time when the level crossing is closed, provided the unconditional safety. A large number of level crossings equipped with automatic level crossing signaling on the Russian railway network determine the relevance of the considering issue. Meanwhile, the notification time of the train's approach to the crossing determines without taking the actual parameters of the train's movement. In this regard, the calculation of the notification time of the train's approach to the crossing based on the maximum speed of the train set on the railway section to ensure safety, which in most cases leads to excessive downtime of motor transport at a closed crossing. It is proposed to solve this problem by determining the train location coordinates on the notification section and, consequently, the actual parameters of its movement by measuring the input resistance of the rail line. It is proposed to use machine learning algorithms and a mathematical apparatus of conformal mappings. The article presents calculations to determine the coordinate of the train at the notification section to the crossing by conformal mapping the area of the output resistances of a rail four-pole to the area of its input resistances. The principal possibility of determining the train entering the notification area and the train coordinates with a sufficiently high accuracy is shown. In the opinion of the authors, the proposed solutions will increase the efficiency of automatic level crossing signaling performance by determining the notification time of the train's approach to the crossing taking the actual parameters of its movement.

Keywords: level crossing notification, rail line insulation resistance, rail line input impedance, conformal mapping, complex plane, rail line four-pole coefficients.

В настоящее время наблюдается увеличение загруженности железнодорожных переездов, что объясняется, во-первых, снижением числа переездов на сети ОАО «РЖД», а, во-вторых, увеличением трафика движения автотранспортных средств и ростом объема железнодорожных перевозок. В этих условиях существующие методы управления устройствами переездной автоматической сигнализации теряют свою эффективность, поскольку учитывают не фактические параметры движения поезда, а установленную максимальную скорость движения поезда на данном участке.

Длительное закрытое состояние переезда, не обоснованное фактическими параметрами движения поездов, приводит к уменьшению его пропускной способности и, как следствие, к экономическим потерям.

Таким образом, задача по минимизации времени закрытого состояния переезда при безусловном выполнении требований обеспечения безопасности движения через переезд является актуальной. Ее решение следует искать в совершенствовании технических и программных средств управления устройствами автоматической переездной сигнализации, которые позволят формировать временные параметры работы переезда такие, как время извещения о приближении поезда к переезду, на основе определения фактических параметров движения поезда.

Для подачи извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду и автоматического управления переездной сигнализацией, устройствами заграждения железнодорожного переезда и автошлагбаумами предполагается организация участка извещения перед переездом.

В соответствии с источником [1] длина такого участка рассчитывается исходя из максимальной скорости движения поезда, установленной на данном участке, и минимальной скорости движения автотранспортных средств в соответствии с правилами дорожного движения, но не менее 8 км/ч при максимальной длине автотранспортного средства 24 м.

Расчетные параметры работы переездной сигнализации определяются следующими зависимостями [2]:

$$t_c^p = f(l_{пер}) + t_{пр} + t_r \text{ при } t_c^p \geq t_{и}^{АПС} (t_{и}^{опов}, t_{и}^{узп}); \quad (1)$$

$$l_c^p = f(l_{пер}, V_{max}); \quad (2)$$

$$t_c^p = \frac{l_{пер} + l_{ат} + l_o}{V_{ат} \cdot 0,28} + t_{пр} + t_r, \quad (3)$$

где l_c^p – расчетная длина участка извещения, м;

$l_{пер}$ – длина переезда, м;

V_{max} – заданная максимальная установленная скорость движения железнодорожного подвижного состава по участку извещения к железнодорожному переезду, м/с;

t_c^p – расчетное время извещения о приближении поезда к переезду, с;

$t_{пр}$ – время срабатывания устройств переездной автоматики, с;

t_r – гарантийное дополнительное время, с;

$t_{и}^{АПС}$ – установленное минимальное значение расчетного времени извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду, оборудованному устройствами автоматической переездной сигнализации (не менее 30 с);

$t_{и}^{опов}$ – установленное минимальное значение расчетного времени извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду, оборудованному устройствами оповестительной сигнализации (не менее 40 с);

$t_{и}^{узп}$ – установленное минимальное значение расчетного времени извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду, оборудованному устройствами заграждения переезда (не менее 45 с);

$l_{ат}$ – максимальная длина автотранспортного средства, м;

$V_{ат}$ – скорость движения автотранспортного средства через переезд, км/ч;

$l_о$ – расстояние от переездного светофора шлагбаума до линии остановки автотранспорта, м;

0,28 – коэффициент для перевода единиц скорости из километров в час в метры в секунду.

При этом во многих случаях устанавливаемое фактическое время подачи извещения на переезд оказывается значительно больше расчетного. Это объясняется следующими обстоятельствами.

Во-первых, для расчетного времени извещения о приближении поезда к железнодорожному переезду установлены минимальные значения в зависимости от оснащённости переезда [1]. Очень часто такие установленные значения являются избыточными по отношению к расчетным значениям времени извещения. Так, например, в работе [2] приведены расчеты времени подачи извещения на переезд. В качестве переменных при расчете приняты различные значения установленных скоростей движения поезда на участке и различные длины переезда. Анализ этих результатов показывает, что во многих случаях рассчитанное время подачи извещения на переезд является избыточным, например, для переездов длиной менее 30 м, оборудованных оповестительной сигнализацией.

Во-вторых, расчет временных параметров работы переездной сигнализации, приведенный в источнике [2], выполняется для максимальной установленной на участке скорости движения поездов. Обращение на участке поездов с широким диапазоном скоростей движения также приводит к увеличению времени подачи извещения.

В-третьих, расчет временных параметров работы переездной сигнализации, приведенный в работе [2], производится с целым рядом допущений, приводящих к увеличению времени извещения, в частности:

при переходе подвижной единицы на участок с меньшей допустимой скоростью изменение скорости принимается мгновенным;

при переходе подвижной единицы на участок с большей допустимой скоростью набор скорости происходит до ее большего значения по условиям равноускоренного движения с ускорением $0,6 \text{ м/с}^2$ для тепловозной тяги и $0,8 \text{ м/с}^2$ для электрической тяги.

В-четвертых, как указано в источнике [2], при определении фактической длины участка извещения необходимо учитывать возможность подачи извещения на переезд от ближайшего к расчетной точке начала участка извещения конца рельсовой цепи (в сторону удаления от переезда).

Перечисленные факторы приводят к значительному увеличению времени подачи извещения на переезд.

Поэтому при подаче извещения на переезд с целью сокращения длительности его закрытого состояния необходимо совершенствовать методы управления устройствами АПС. Эти методы должны учитывать такие параметры движения приближающегося к переезду поезда, как его фактическая скорость и фактическое ускорение.

Известны технические решения, позволяющие реализовать управление автоматической переездной сигнализацией с учетом реальных параметров движения поезда на участке извещения к переезду. Условно их можно разделить на несколько групп.

Первая группа основывается на применении дополнительных технических средств, позволяющих определять скорость движения поезда и его ускорение на участке извещения, таких как спутниковая навигация, радиоканал и др. [3, 4]. Общим недостатком данной группы технических решений является необходимость установки дополнительного оборудования, в том числе и на локомотивах, что приводит к значительной стоимости реализации подобных методов.

Вторая группа основывается на использовании набирающих все большую популярность распределенных оптоволоконных датчиков [5]. Предусматривается расположение оптоволоконных датчиков вдоль железнодорожного полотна. При этом применяются методы

регистрации и обработки оптического интерференционного рассеянного сигнала, вызванного вибрационным возмущением чувствительного световода распределенного волоконно-оптического датчика, выполненного в виде оптоволоконного кабеля. Недостатком подобных методов является то, что наибольшая эффективность подобных датчиков достигается при укладке оптоволоконного кабеля в теле насыпи по центральной оси пути, что на действующих участках железных дорог выполнить затруднительно. В целях обеспечения сохранности оптоволоконного кабеля следует предусматривать его расположение в полиэтиленовых трубах. Данное обстоятельство существенно уменьшает вибрационное воздействие проходящего поезда и, как следствие, снижает точность определения координаты нахождения поезда на участке извещения. Кроме того, в случае применения оптоволоконных датчиков для определения координаты приближающегося к переезду поезда необходимо учитывать большое количество влияющих факторов, например, тип балласта, тип локомотива, вес поезда, длина поезда, наличие второго (третьего) пути и т. п.

Еще одна группа методов подачи извещения на переезд о приближении поезда с учетом фактических параметров его движения реализована с использованием существующих рельсовых цепей путем измерения значения входного сопротивления рельсовой линии [6]. Положительным свойством подобных методов является использование уже имеющейся на большинстве железнодорожных участков инфраструктуры (рельсовых цепей). На современном этапе задача классификации режимов работы рельсовых цепей, в том числе определение места наложения шунта (координаты поезда на участке извещения), может быть решена на основе применения методов машинного обучения. Известны работы, в которых приводится решение задачи классификации режимов работы рельсовых цепей на основе применения методов логистической регрессии, полиномиального преобразования Эрмита, метода опорных векторов [7 – 9]. В качестве общего принципа для определения текущей координаты поезда применяется измерение амплитуды напряжения и тока на питающем конце рельсовой цепи. В патенте [10] показано применение обучаемого классификатора состояния рельсовой линии, в котором по предварительно измеренным амплитудам напряжения и тока при различных значениях координаты расположения поездного шунта от начала участка извещения до переезда формируется множество значений напряжения, тока и соответствующих им координат поезда. На основании этих данных составляется система уравнений координаты расположения поезда, правую часть которой приравнивают к значениям координат поезда. В результате решения данной системы уравнений определяются коэффициенты уравнения координаты поезда. По результатам измерения текущих значений напряжения и тока с помощью уравнения координаты поезда определяется текущая координата на участке приближения. По полученным координатам определяется скорость поезда на участке, а с учетом возможного ускорения поезда может быть определено фактическое значение времени закрытия переезда.

Вместе с тем значительным препятствием для успешной реализации подобных методов является изменение в широких пределах первичных параметров рельсовой линии, таких как удельное сопротивление рельсовой линии и удельное сопротивление изоляции. Для компенсации данной зависимости применяются различные методы. В частности, в патенте [10] предложен способ корректировки коэффициентов уравнения координаты поезда в момент вступления поезда на участок извещения, длина которого заранее известна. Повышение точности определения координаты и скорости поезда, а следовательно, и фактического времени закрытия переездных ограждающих устройств достигается за счет сравнения определенной уравнением координаты расположения поезда с координатой начала участка приближения фиксированной длины. При различии значений, т. е. при появлении ошибки, выполняется корректировка коэффициентов уравнения координаты поезда до получения равенства вычисленной координаты поезда фактической координате начала участка извещения, после чего определяются скорость поезда и фактическое время закрытия переезда.

Важнейшим вопросом при организации извещения о приближении поезда к переезду с учетом фактических параметров его движения является обеспечение требуемого уровня безопасности. В соответствии со стандартом [11] интенсивность опасных отказов переездных систем при выполнении ими установленных проектом функций должна быть не более $1 \cdot 10^{-8}$ 1/ч на переезд. При этом критериями опасного отказа переездных систем, выполняющих функции формирования извещения на переезд, являются следующие:

отсутствие извещения на переезд или формирование его за время менее расчетного времени извещения на переезд (недостаточное для заблаговременного освобождения переезда от транспортных средств);

снятие извещения на переезд при сохранении действия условий, инициирующих подачу извещения;

отсутствие формирования сигнала, запрещающего движение транспортных средств через переезд, при отказе устройств формирования извещения на переезд.

Для решения вопросов обеспечения безопасности рассмотренных выше аппаратно-программных средств подачи извещения на переезд с учетом фактических параметров движения поезда при использовании рельсовых цепей следует рассмотреть применение двухканального измерения входных параметров рельсовой линии с последующей обработкой сигналов в параллельном режиме и сравнением полученных результатов вычислений. Диверсификация аппаратных и программных средств может быть достигнута за счет применения альтернативных методов определения фактических параметров движения поезда на участке приближения к переезду.

В качестве такого метода предлагается дополнительно к предложенному в патенте [10] способу управления автоматической переездной сигнализацией для определения фактических параметров движения поезда на участке извещения к переезду рассмотреть вариант применения математического аппарата конформных отображений. Данный математический аппарат позволяет в режиме реального времени определять области входных сопротивлений рельсовой линии, что дает возможность по изменению входного сопротивления с высокой точностью определять координату подвижной единицы на пути [12, 13].

Конформным отображением называется биекция области Z на область W такая, что в окрестности любой точки Z главная часть взаимнооднозначного отображения есть ортогональное преобразование с сохранением ориентации [14].

В качестве нагрузки четырехполюсника рельсовой линии следует рассматривать область комплексных значений, которые изменяются от $Z = 0$ (короткое замыкание рельсовой линии) до $Z = \infty$ (работа рельсовой линии в режиме холостого хода). Таким образом, всевозможные значения сопротивления нагрузки с неотрицательной действительной частью представляют правую полуплоскость комплексной плоскости. В результате конформного преобразования правой полуплоскости комплексных чисел, дополненной бесконечно удаленной точкой, получаем множество значений входного сопротивления, имеющих форму окружности, лежащих в правой полуплоскости.

Правая полуплоскость $\text{Re } Z \geq 0$ при конформном отображении перейдет на окружность, как показано на рисунке 1. В результате такого преобразования получаем область значений входных сопротивлений четырехполюсника рассматриваемой рельсовой линии, используемой в качестве участка извещения о приближении поезда к переезду. Для любой нагрузки значение измеренного входного сопротивления будет находиться в полученной области. Размер и место нахождения области полностью зависят от параметров рельсового четырехполюсника. Преимуществом конформного преобразования является возможность графически отобразить область изменения входного сопротивления для данного режима работы рельсовой цепи участка извещения, что позволяет получить геометрическую наглядность полученных результатов.

Нормальная область при конформном отображении определяется как область входных сопротивлений, измеренных при свободной и исправной рельсовой линии.

В соответствии со статьей [15] результатом конформного преобразования прямой вида $\text{Re}(\lambda Z) = \alpha$ является окружность с центром в точке

$$\omega_0 = \frac{2\alpha\overline{AC} + \overline{AD}\overline{\lambda} + \overline{BC}\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\text{Re}(C\overline{D}\overline{\lambda})} \quad (4)$$

и радиусом

$$R = \left| \frac{(AD - BC)\lambda}{2\alpha|C|^2 + 2\text{Re}(C\overline{D}\overline{\lambda})} \right|, \quad (5)$$

где A, B, C, D – коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии;

α, λ – коэффициенты уравнения прямой;

$\overline{B}, \overline{C}, \overline{D}, \overline{\lambda}$ – сопряженные комплексные величины.

Таким образом, область нормального состояния рельсовой линии определяется как область входных сопротивлений, рассчитанных для свободной и исправной рельсовой линии. Точки $Z = \infty$ и $Z = 0$ отобразятся на границу области, как W_∞ и W_0 (т. е. на окружность с центром ω_0 и радиусом R) входного сопротивления, как показано на рисунке 1.

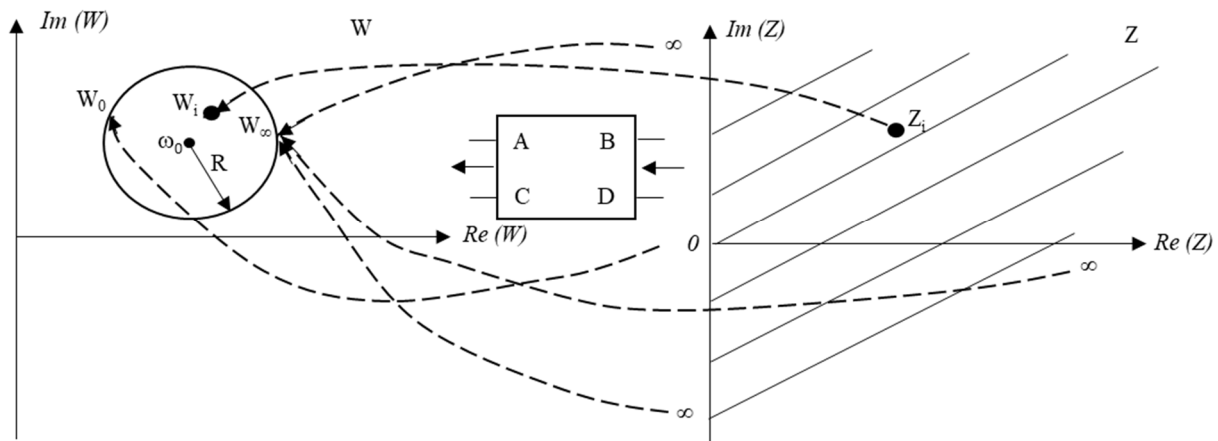


Рисунок 1 – Пример конформного преобразования на комплексной плоскости при фиксированных значениях параметров четырехполюсника рельсовой линии

При шунтовом режиме прямая $\text{Re}(\lambda Z) = \alpha$ трансформируется в прямую $X = 0$. Этой прямой соответствуют параметры $\lambda = 1$ и $\alpha = 0$. Тогда уравнение для этой прямой можно записать, как $\text{Re}(Z) = 0$. В то же время прямая $\text{Re}(Z) = 0$ является границей правой полуплоскости комплексной плоскости. С учетом изложенного и на основании формул (4) и (5) при шунтовом режиме результатом конформного преобразования прямой вида $\text{Re}(Z) = 0$ является окружность с центром в точке

$$\omega_0 = \frac{\overline{AD} + \overline{BC}}{2\text{Re}(C\overline{D})} \quad (6)$$

и радиусом

$$R = \frac{AD - BC}{2\text{Re}(C\overline{D})}. \quad (7)$$

Очевидно, что при движении поезда по участку извещения входное сопротивление рельсовой линии будет изменяться, а следовательно, будут изменяться место расположения

центра окружности и ее радиус. Проанализируем направление перемещения окружностей (областей входного сопротивления рельсовой линии) в зависимости от места положения шунта от начала участка извещения к переезду.

При появлении шунта в начале участка извещения окружность начинает свое перемещение в сторону уменьшения комплексного значения входного сопротивления полного шунтирования.

По мере движения подвижной единицы сопротивление вносимого шунта будет уменьшаться, и соответственно будет уменьшаться радиус окружности.

Покажем принципиальную возможность определения места нахождения поезда на участке извещения к переезду по предложенной гипотезе перемещения областей входного сопротивления рельсовой линии при наложении шунта $R_{ш}$ в различных ее точках в результате конформного преобразования области выходного сопротивления рельсовой линии на область входных сопротивлений. Для этого выполним расчеты по определению координат центров окружностей, получаемых в результате конформных преобразований, и значений радиусов этих окружностей.

Коэффициенты рельсового четырехполюсника можно выразить через вторичные параметры рельсовой линии [16]:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\gamma l_p & Z_b \cdot sh\gamma l_p \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh\gamma l_p & ch\gamma l_p \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где Z_b – волновое сопротивление рельсовой линии, Ом;

γ – коэффициент распространения волны, 1/км;

l_p – длина рельсовой линии, км.

Волновое сопротивление линии и коэффициент распространения определяются по формулам [16]:

$$Z_b = \sqrt{Z_n \cdot r_n}; \quad (9)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_n}{r_n}}, \quad (10)$$

где Z_n – удельное сопротивление рельсовой петли переменному току, Ом/км;

r_n – удельное сопротивление изоляции рельсовой линии, Ом · км.

Как известно, коэффициенты четырехполюсника $A_{ш}$, $B_{ш}$, $C_{ш}$ и $D_{ш}$ рельсовой линии в шунтовом режиме вычисляются по формуле [16]:

$$\begin{pmatrix} A_{ш} & B_{ш} \\ C_{ш} & D_{ш} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\gamma l_2 & Z_b \cdot sh\gamma l_2 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh\gamma l_2 & ch\gamma l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{ш}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ch\gamma l_1 & Z_b \cdot sh\gamma l_1 \\ \frac{1}{Z_b} \cdot sh\gamma l_1 & ch\gamma l_1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта (поперечное сопротивление);

l_1 , l_2 – координаты наложения шунта от конца и от начала рельсовой линии участка извещения соответственно.

Для проведения расчетов необходимо определить значения первичных параметров рельсовой линии: удельное сопротивление рельсовой петли переменному току Z_n и удельное сопротивление изоляции рельсовой линии r_n .

Удельное сопротивление рельсовой линии является комплексной величиной. Для нахождения значения активного удельного сопротивления рельсовой петли можно воспользоваться формулой Неймана [17]:

$$r_a = \frac{0,28}{p} \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}, \quad (12)$$

где p – периметр поперечного сечения рельсов, см (для Р65 = 70 см);
 μ – относительная магнитная проницаемость;
 ρ – удельное сопротивление рельсовой стали, 0,21 Ом · мм²/м;
 f – частота сигнального тока.

С учетом указанных данных можно рассчитать активное сопротивление рельсовой линии для частоты сигнального тока 580 Гц по формуле (12):

$$r_a = 0,441 \text{ Ом/км.}$$

Согласно статье [17] индуктивность рельсов определяется по формуле:

$$L_p = L_e + L_i, \quad (13)$$

где L_e, L_i – внешняя и внутренняя индуктивность рельса, мГн/км.

Значение внешней индуктивности рельса может быть получено по формуле:

$$L_e = 0,4 \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot a - p}{p}, \quad (14)$$

где a – расстояние между осями рельсов, равное 1,52 м.

Рассчитав значение L_e для частоты сигнального тока 580 Гц по формуле (14), получим внешнюю индуктивность равной 1,014 мГн/км.

В соответствии со статьей [17] значение внутренней индуктивности может быть определено по формуле:

$$L_i = \frac{0,168 \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{1}{p}. \quad (15)$$

Расчеты, выполненные по формуле (15), показали, что значение внутренней индуктивности рельсов L_i для частоты сигнального тока 580 Гц равно 0,0128 мГн/км.

Согласно статье [17] полное удельное сопротивление рельсовой петли

$$Z_n = 2 \cdot (r_a + j \cdot \omega \cdot L_p). \quad (16)$$

Подставив в формулу (16) определенные по формулам (12), (14), (15) значения активного удельного сопротивления рельсовой петли, а также внутренней и внешней индуктивностей рельса, найдем полное сопротивление рельсовой петли длиной 1 км сигнальному току частотой 580 Гц. После расчетов получаем: $Z_n = 0,441 + j3,76$ Ом/км (в показательной форме $3,788e^{j84^\circ}$ Ом/км).

Используя правила перемножения матриц, из формулы (11) можно получить коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии при шунтовом режиме:

$$A_{ш} = ch(\gamma l_1) \cdot \left(ch(\gamma l_2) + \frac{Z_B}{R_{ш}} \cdot sh(\gamma l_2) \right) + sh(\gamma l_1) \cdot sh(\gamma l_2); \quad (17)$$

$$B_{ш} = Z_B \cdot \left(sh(\gamma l_1) \cdot \left(ch(\gamma l_2) + \frac{Z_B}{R_{ш}} \cdot sh(\gamma l_2) \right) + sh(\gamma l_2) \cdot ch(\gamma l_1) \right); \quad (18)$$

$$C_{\text{ш}} = ch(\gamma l_1) \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{в}}} \cdot sh(\gamma l_2) + \frac{1}{R_{\text{ш}}} \cdot ch(\gamma l_2) \right) + \frac{1}{Z_{\text{в}}} \cdot ch(\gamma l_2) \cdot sh(\gamma l_1); \quad (19)$$

$$D_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} \cdot sh(\gamma l_1) \cdot \left(\frac{1}{Z_{\text{в}}} \cdot sh(\gamma l_2) + \frac{1}{R_{\text{ш}}} \cdot ch(\gamma l_2) \right) + ch(\gamma l_2) \cdot ch(\gamma l_1). \quad (20)$$

Выполним расчет рельсовой линии, используемой в качестве участка извещения о приближении поезда к переезду, при следующих условиях: длина рельсовой линии – 650 м, частота сигнального тока – 580 Гц.

Результаты расчетов приведены на рисунке 2. На рисунке показаны области значений входных сопротивлений четырехполюсника рассматриваемой рельсовой линии при нормальном режиме (рельсовая линия исправна и свободна) при значениях сопротивления изоляции 1; 1,5; 2,0; 2,5 Ом · км. Расчет проводился в соответствии с формулами (4), (5). Значение удельного сопротивления рельсовой линии определено по формулам (12) – (16).

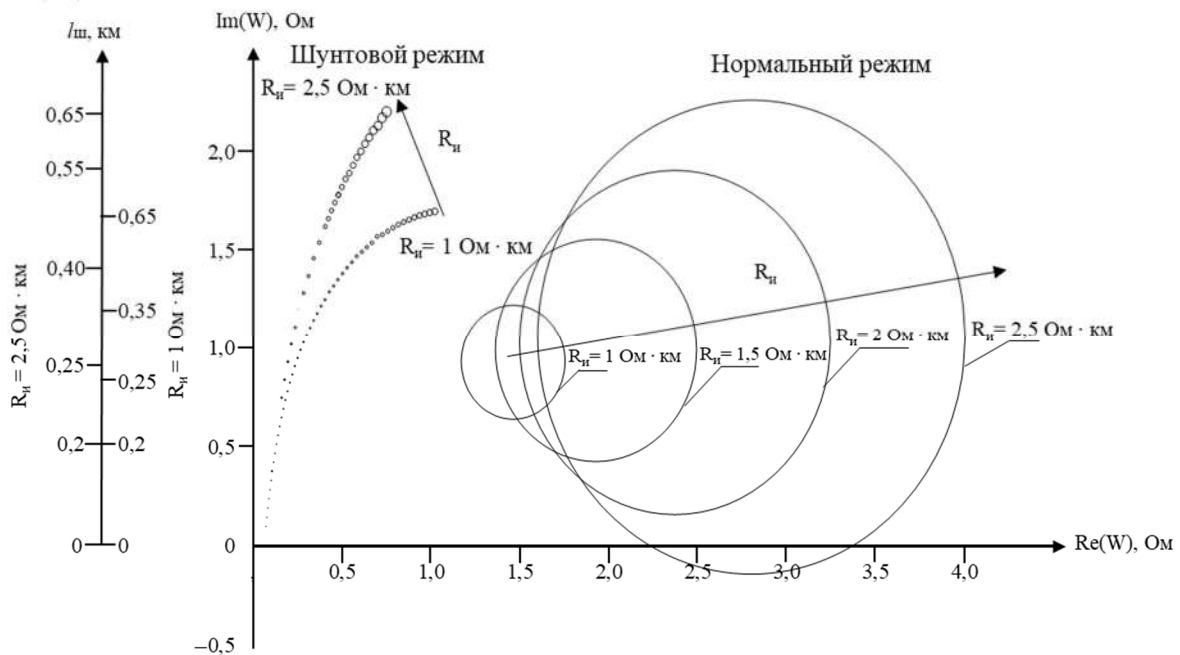


Рисунок 2 – Результаты конформного преобразования области выходного сопротивления рельсовой линии на область входных сопротивлений для нормального и шунтового режимов

Как видно из рисунка 2, при увеличении значения сопротивления изоляции при нормальном режиме радиус окружностей (областей входного сопротивления рельсовой линии) увеличивается, а их центры смещаются в сторону увеличения значения комплексного входного сопротивления рельсовой линии.

Расчет шунтового режима выполнялся для нормативного значения шунта (0,06 Ом) при значениях сопротивления изоляции 1; 2,5 Ом · км. Место наложения шунта (координата нахождения поезда на участке извещения к переезду) изменялось через каждые 12,5 м. Результаты расчетов показывают, что при продвижении поезда по участку извещения радиусы получаемых в результате конформного преобразования окружностей уменьшаются, а их центры смещаются в сторону уменьшения значений комплексного входного сопротивления рельсовой линии. Таким образом, на рисунке 2 показано перемещение области входного сопротивления рельсовой линии участка извещения в зависимости от места наложения шунта $l_{\text{ш}}$.

Как следует из рисунка 2, области входного сопротивления при нормальном и шунтовом режимах не пересекаются, что позволяет определить факт вступления поезда на участок извещения.

Таким образом, показана принципиальная возможность применения математического аппарата конформных отображений для определения координаты нахождения поезда на участке извещения к переезду, а следовательно, определения фактических параметров (скорости и ускорения) его движения.

Список литературы

1. Условия эксплуатации железнодорожных переездов / утв. приказом Минтранса России № 237 от 31.07.2015. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.gov.ru/file/400693> (дата обращения: 21.03.2024).
2. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Расчет параметров работы переездной сигнализации. – Санкт-Петербург : Гипротрансигналсвязь, 2000. – 35 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2659913 Российская Федерация, МПК В61L 25/02. Система контроля местоположения поезда: № 2017129877: заявлено 24.08.2017: опубликовано 04.07.2018 / Болотов П. В., Воробьев В. В., Воронин В. А., Ермаков Е. В., Кононенко А. С., Маркевич М. В., Миронов В. С., Розенберг Е. Н., Соловьева А. М., Талалаев Д. В.; патентообладатель АО «НИИАС». – 14 с.: ил. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 2560227 Российская Федерация, МПК В61L 25/025. Система контроля местоположения поезда: № 2014114358/11: заявлено 11.04.2014: опубликовано 20.08.2015 / Ананьин А. С., Воробьев В. В., Воронин В. А., Болотов П. В., Кононенко А. С.; патентообладатель ОАО «РЖД». – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.
5. Патент № 2732685 Российская Федерация, МПК В61L 29/24. Устройство управления системой автоматической переездной сигнализации: № 2019126243: заявлено 19.08.2019: опубликовано 21.09.2020 / Попов А. Н., Галинуров Р. З.; патентообладатель УрГУПС. – 10 с.: ил. – Текст : непосредственный.
6. Авторское свидетельство № 1766757 СССР, МПК В61L 25/04, G01P 5/18. Устройство для контроля скорости поезда: № 4767353/11 : заявлено 07.12.1989 : опубликовано 01.10.1992 / Полевой Ю. И., Алиев М. М., Артюхов Н. Н., Кравцова Н. А.; патентообладатель ТИИЖТ. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.
7. Борисенко, Д. В. Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи на основе логистической регрессии / Д. В. Борисенко, И. В. Присухина, С. А. Лунев. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 67–72.
8. Борисенко, Д. В. Машинная классификация режима работы электрической рельсовой цепи методом опорных векторов / Д. В. Борисенко, И. В. Присухина. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 126–130.
9. Присухина, И. В. К вопросу о классификации режима работы электрической рельсовой цепи с применением ортогональных многочленов Эрмита / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко, С. А. Лунев. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы международной научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения; отв. ред. В. Т. Черемисин. – Омск, 2018. – С. 67–76.
10. Патент № 2651379 Российская Федерация, МПК В61L 29/22. Устройство управления автоматической переездной сигнализацией: № 2016113947 : заявлено 11.04.2016 : опубликовано 19.04.2018 / Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Герус В. Л.; патентообладатель СамГУПС. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
11. ГОСТ 33893–2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 16 с. – Текст : непосредственный.
12. Лунев, С. А. Мониторинг динамических параметров обратной тяговой рельсовой сети / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, Р. Ш. Аюпов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2008. – № 4 (19). – С. 74–76.

13. Применение аппарата конформных отображений для непрерывного контроля координаты подвижной единицы на пути / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 94–99.
14. Лаврентьев, М. А. Методы теории функции комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – Москва : Наука, 1987. – 688 с. – Текст : непосредственный.
15. Непрерывная оценка состояния обратной тяговой рельсовой сети в условиях организации тяжеловесного движения / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, И. В. Присухина, А. Г. Ходкевич. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 2–9.
16. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с. – Текст : непосредственный.
17. Первичные параметры рельсовой линии различных участков железных дорог / А. Антонов, Е. Антонова, А. Д. Чахьяни, Г. Чернева. – Текст : непосредственный // Механика, транспорт, коммуникации. – 2022. – Т. 20. – № 3/2. – С. XI-8–XI-12.

References

1. *Usloviia ekspluatatsii zheleznodorozhnykh perezdov* [Operating conditions of railway crossings]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/file/400693> (accessed 21.03.2024).
2. Guidelines for the design of automation, telemechanics and communication devices in railway transport. Calculation of the level crossing signaling system parameters. Saint-Petersburg, «Giprotranssignalsviaz'» Publ., 2000, 35 p. (In Russian).
3. Bolotov P.V., Vorob'ev V.V., Voronin V.A., Ermakov E.V., Kononenko A.S., Markevich M.V., Mironov V.S., Rozenberg E.N., Solov'eva A.M., Talalaev D.V. *Patent RU 2659913 C1*, 04.07.2018.
4. Anan'in A.S., Vorob'ev V.V., Voronin V.A., Bolotov P.V., Kononenko A.S. *Patent RU 2560227 C1*, 20.08.2015.
5. Popov A.N., Galinurov R.Z. *Patent RU 2732685 C1*, 21.09.2020.
6. Polevoy Yu.I., Aliev M.M., Artyuhov N.N., Kravtsova N.A. *Copyright certificate SU 1766757 AI*, 01.10.1992.
7. Borisenko D.V., Prisukhina I.V., Lunev S.A. Machine state classification of electric track circuit by means of logistic regression. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 4 (160), pp. 67-72 (In Russian).
8. Borisenko D.V., Prisukhina I.V. Machine state classification of electric track circuit by means of support vector machine. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 126-130 (In Russian).
9. Prisukhina I.V., Borisenko D.V., Lunev S.A. On the problem of track circuit state classification using the orthogonal Hermite polynomials. *Razrabotka i ekspluatatsiia elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Development and operation of energy and land transport electrical complexes and systems, materials of the international scientific and practical conference]. Omsk, 2018, pp. 67-76 (In Russian).
10. Tarasov E.M., Zhelezov D.V., Gerus V.L. *Patent RU 2651379 C2*, 19.04.2018.
11. National Standard 33893-2016. Railway automation and telemechanics systems at railway crossings. Safety requirements and control methods. Moscow, Standardinform Publ., 2017. 16 p. (In Russian).
12. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Ayupov R.Sh. Monitoring of dynamic parameters of reverse traction railway network. *Transport of the Urals*, 2008, no. 4 (19), pp. 74-76 (In Russian).
13. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Sokolov M.M., Hodkevich A.G. Application of the apparatus of conformal mappings for continuous monitoring coordinates rolling stock on the railway. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 1 (17), pp. 94-99 (In Russian).

14. Lavrentyev M.A., Shabat B.V. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo* [Methods of a complex variable function theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 688 p. (In Russian).

15. Lunev S.A., Seroshtanov S.S., Prisukhina I.V., Hodkevich A.G. The uninterrupted state evaluation of backward traction circuit in heavyweight traffic conditions. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 2-9 (In Russian).

16. Arkatov V.S., Arkatov Yu.V. *Rel'sovye tsepi magistral'nykh zheleznykh dorog* [Mainline railways track circuits]. Moscow, LLC Missiya-M Publ., 2006, 496 p. (In Russian).

17. Antonov A., Antonova E., Cahyani A.D., Cherneva G. Rail line primary parameters of different railways sections. *Mekhanika, transport, kommunikatsii – Mechanics, transport, communications*, 2022, vol. 20, no. 3/2, pp. XI-8-XI-12 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунев Сергей Александрович

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 649-19-29.

E-mail: slunev@mail.ru

Гришечко Сергей Владимирович

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) 44-39-01.

E-mail: svgrishechko@mail.ru

Ключников Максим Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лунев, С. А. Повышение эффективности работы устройств автоматической переездной сигнализации / С. А. Лунев, С. В. Гришечко, М. В. Ключников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 73 – 84.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lunev Sergey Alexandrovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Transport infrastructure management systems», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 649-19-29.

E-mail: slunev@mail.ru

Grishechko Sergey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Automatics and Telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: svgrishechko@mail.ru

Klyuchnikov Maxim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Lecturer of the department «Automatics and Telemechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-01.

E-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lunev S.A., Grishechko S.V., Klyuchnikov M.V. Increasing the automatic level crossings signaling performance efficiency. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 73-84 (In Russian).

И. В. Смелянский¹, В. В. Третьяков¹, А. Н. Коньшков²

¹ООО «Синара Алгоритм», г. Москва, Российская Федерация;

²АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
г. Москва, Российская Федерация

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОПУСКА ПОЕЗДОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРУГИХ ПОДШАЛЬНЫХ ПРОКЛАДОК В СТЫКАХ

Аннотация. Приведены результаты натурных испытаний по исследованию условий установления скоростей движения поездов в зависимости от величины зазора в стыке. Появление зазоров величиной более 30 мм в стыке возникает в условиях больших отрицательных температур на участках при перепадах дневных и ночных температур рельса.

В статье освещен вопрос, связанный с нормативами ограничения скоростей движения от величины зазора в стыке и негативного влияния этих ограничений на перевозочный процесс.

Представлен обзор результатов ранее проведенных испытаний, в которых для компенсации просядок в стыке применялись упругие подшальные прокладки. Отмечено, что эти испытания проводились при зазоре 10 мм.

Условия проведения исследований включали в себя оценку напряжений в стыковых накладках от подвижного состава при разных скоростях движения с различными величинами зазора в стыке. Помимо напряжений были измерены также величины ускорений на подошве рельса как один из факторов, влияющих на накопление остаточных осадков пути. Определялись напряжения в шейке рельса в зоне первого стыкового отверстия на рельсе.

На опытном подвижном составе проводилось измерение коэффициентов вертикальной динамики необрессоренных масс и ускорений буксового узла.

Для указанных условий были определены параметры взаимодействия подвижного состава и пути. По результатам проведенных испытаний были сделаны выводы о том, что применение упругих подшальных прокладок в стыках позволяет повысить скорости движения при величине зазора в стыке 30 – 32 мм, а также рекомендовать при текущем содержании железнодорожного пути их применение в различных видах стыков, в том числе и сварных.

Ключевые слова: железнодорожный путь, стык, стыковой зазор, динамика подвижного состава, подшальные прокладки.

Igor V. Smelyanskiy¹, Vasily V. Tretyakov¹, Alexander N. Konyshkov²

¹LLC «Sinara Algorithm», Moscow, the Russian Federation;

²Joint Stock Company «Railway Research Institute» (JSC «VNIIZhT»), Moscow, the Russian Federation

THE POSSIBILITY OF INCREASING THE SPEED OF PASSING TRAINS BY USING ELASTIC FOOTINGS IN RAIL JOINTS

Abstract. The results of field tests to study the conditions for setting train speeds depending on the size of the gap at the railway joint are presented. The appearance of gaps of more than 30 mm in the railway joint occurs under conditions of high negative temperatures in sections with differences in day and night rail temperatures. The article highlights the issue related to the standards for limiting the speed of movement from the value of the gap in the railway joint and the negative impact of these restrictions on the transportation process.

An overview of the results of previous tests in which elastic sleeper pads were used to compensate for subsidence in the joint is presented. It is noted that these tests were carried out with a gap of 10 mm in the railway joint.

The conditions for the studies included an assessment of the stresses in the butt plates from the rolling stock at different speeds with different values of the gap in the railway joint. In addition to stresses, the acceleration values at the bottom of the rail were also measured, as one of the factors affecting the accumulation of residual track sediments. Stresses in the rail neck in the zone of the first butt hole on the rail were determined.

The experimental rolling stock was used to measure the coefficients of vertical dynamics of unsprung masses and accelerations of the axle box assembly.

For these conditions, the parameters of interaction between rolling stock and track were determined. Based on the results of the tests, it was concluded that the use of elastic sleeper pads in railway joints makes it possible to increase the speed of movement with a gap in the joint of 30-32 mm, as well as recommend their use in various types of joints, including welded ones, at the maintenance of the railway track.

Keywords: railway track, butt joint, butt gap, dynamics of rolling stock, sleeper gaskets.

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Несмотря на широкое распространение бесстыкового пути на сети продолжает оставаться значительное количество стыков на железобетонных шпалах. Это стыки в уравнильных пролетах, в местах временного восстановления целостности плетей после изъятия остродефектных рельсов, в изолирующих стыках и т. д.

Наличие стыков остается слабым местом конструкции верхнего строения пути (ВСП), и при определенных условиях может возникнуть отказ в виде излома стыковых болтов или стыковых накладок [1]. Катализаторами появления и роста подобных дефектов являются стыковые зазоры свыше разрешенных норм и значительные перепады дневных и ночных температур.

Нормирование скоростей движения по таким стыкам в зависимости от величины зазора впервые было введено в Инструкции по техническому содержанию пути ЦП-774. До этого (ЦП 2913) нормировалась только величина зазора в стыке в зависимости от температуры рельсов.

Согласно п. 3.1.10 Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути [2], а также п. 68 ПТЭ РФ [3] скорость движения поездов в зависимости от величины зазора ограничивается согласно данным таблицы.

Величина зазора в стыке

Величина стыкового зазора, мм, при диаметре отверстий в рельсах 36 мм	Скорость поезда, км/ч
Более 24 до 26	100
Более 26 до 30	60
Более 30 до 35	25
Более 35	Движение закрывается

С точки зрения организации перевозочного процесса наибольшее негативное влияние оказывают ограничения скоростей движения с 60 до 25 км/ч. Например, при плотности поездопотока более 90 пар/сут появление такого ограничения снижает пропускную способность более чем в полтора раза.

В период 2011 – 2020 гг. на Экспериментальном кольце на ст. Щербинка был проведен комплекс исследований по оценке влияния укладки упругих амортизирующих прокладок под шпалы на расстройство пути в стыковой зоне [4 – 6].

Результаты испытаний позволили определить, что после укладки упругих подшпальных прокладок при устранении просадок глубиной до 14 мм дополнительная выправка не потребовалась до пропуска более 800 млн т;

ускорения на принимающих шпалах стыка с упругими прокладками в 2,9 раза по средним значениям и в 2,65 раза по максимальным значениям ниже, чем в типовом стыке.

Однако эти испытания проводились при зазорах в стыках в пределах 10 мм. Полученные данные позволили поставить вопрос о возможности повышения скоростей пропуска поездов при зазорах 31 – 32 мм при укладке упругих прокладок под шпалы после проведения соответствующих исследований.

Управлением пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» было инициировано проведение комплекса испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (ст. Щербинка), где был оборудован опытный участок: рельсы Р65 длиной 25 м, скрепления ЖБР65 на железобетонных шпалах, КД на деревянных шпалах, типовые шестидырные накладки и болты с нормативными параметрами затяжки болтов и гаек. Опытный подвижной состав включал в себя типовые грузовые полувагоны с осевой нагрузкой 23,5 т/ось.

С целью доказательства данной гипотезы в ходе испытаний необходимо было определить следующее.

1. Напряженное состояние работы стыка и его элементов с целью выявления факторов, влияющих на излом стыковых накладок и болтов.

2. Условия ограничения скорости движения поездов в зависимости от величины зазора в стыке и изменения реакции подвижного состава.

Схема расстановки измерительных датчиков в стыковой зоне опытного стыка представлена на рисунке 1.

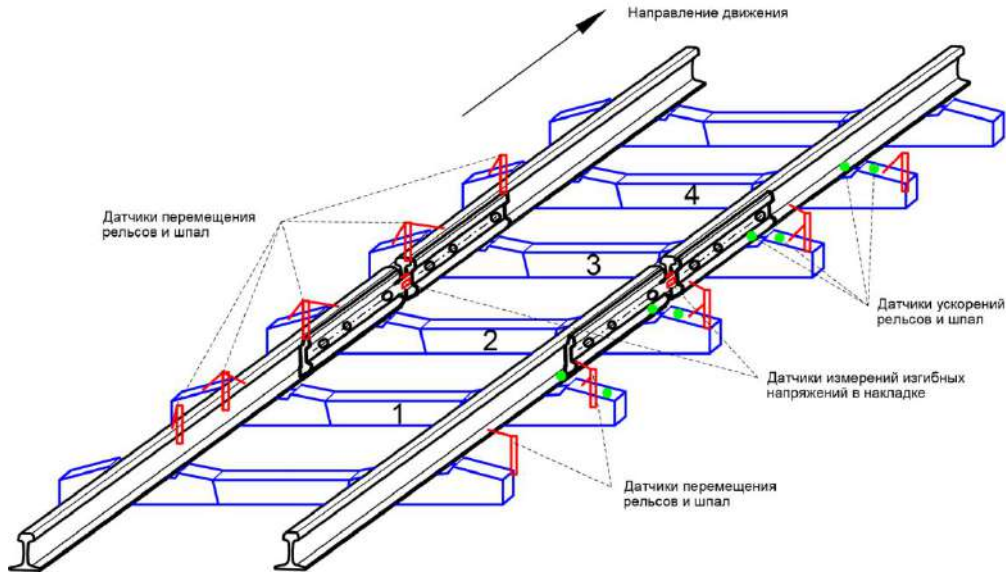


Рисунок 1 – Схема расстановки датчиков измерения на опытном стыке

В качестве основного показателя, характеризующего силовое взаимодействие пути и подвижного состава в зоне стыков, были приняты напряжения в стыковых накладках. В ходе исследований рассматривались три варианта работы стыка: стык без просадки, стык с просадкой 15 мм и стык после устранения просадки с помощью упругой подшпальной прокладки толщиной 14 мм.

Зависимости напряжений в накладках от величины зазора в стыке при скорости 25 км/ч приведены на рисунке 2. Как видно из графиков, приведенных на рисунке 2, при отсутствии просадки в стыке напряжения равномерно возрастают, но во всем диапазоне зазоров от 24 до 35 мм не превышают 130 МПа.

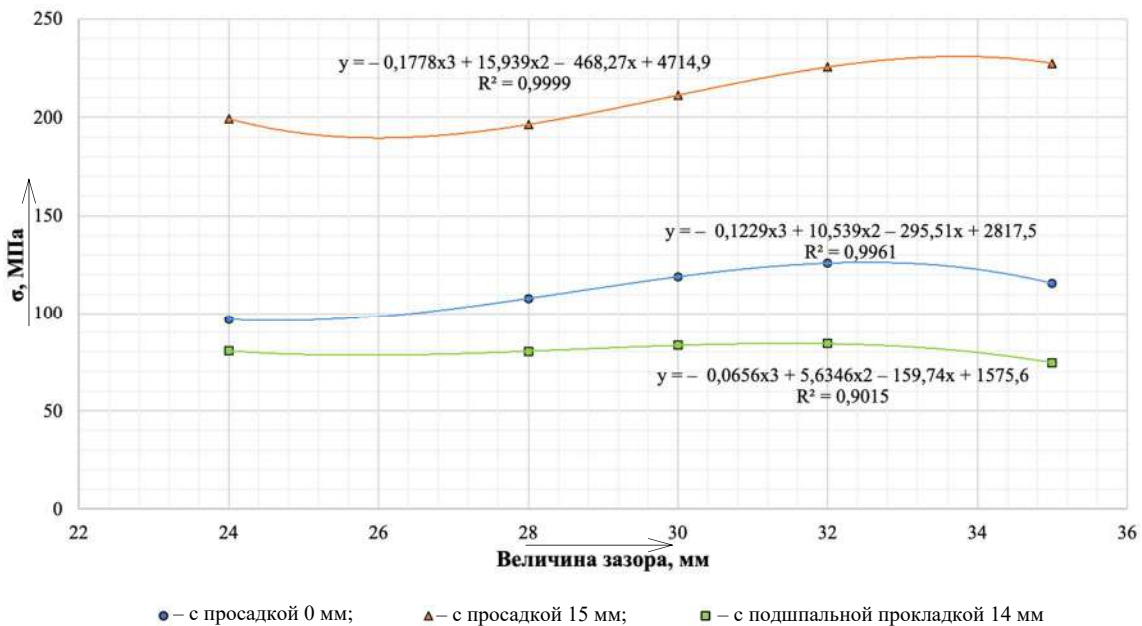


Рисунок 2 – Зависимости напряжений в накладках от величины зазора в стыке на железобетонных шпалах при скорости движения 25 км/ч

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

При наличии просадки 15 мм напряжения резко возрастают до 220 МПа, а после укладки упругих прокладок снижаются более чем в два раза.

При зазорах 30 и 32 мм при наличии упругих прокладок величины напряжений практически одинаковы и не превышают 80 МПа.

Аналогичная картина наблюдается при скорости 40 км/ч (рисунок 3) – величины напряжений при укладке подшпальной прокладок не превышают 70 МПа и практически одинаковы при зазорах 30 и 32 мм.

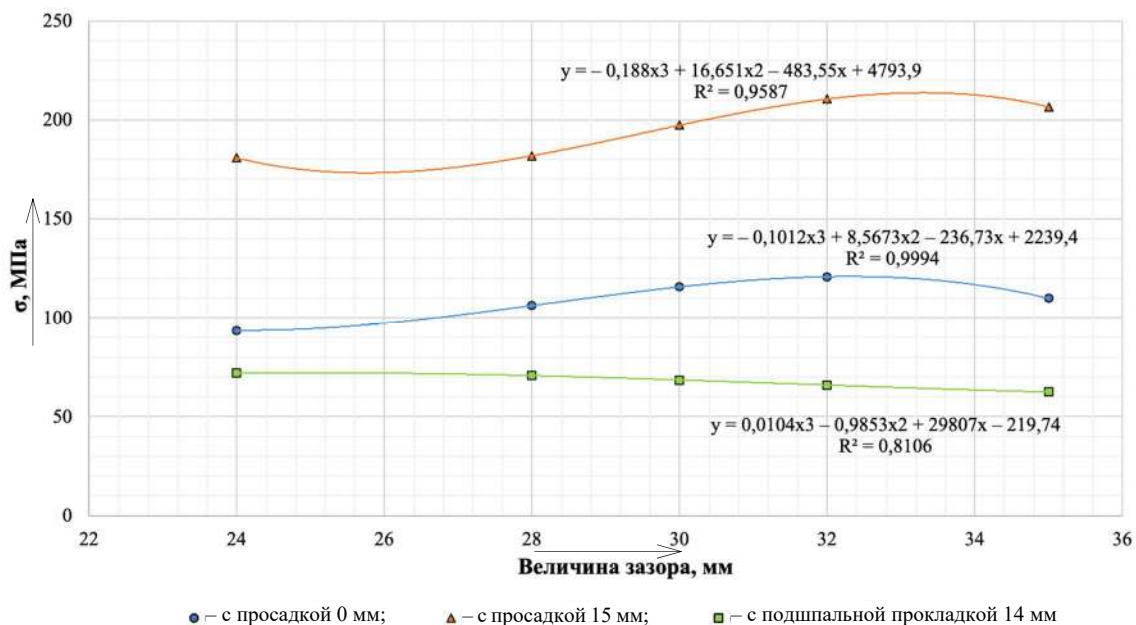


Рисунок 3 – Зависимости напряжений в накладках от величины зазора в стыке на железобетонных шпалах при скорости движения 40 км/ч

При скорости 60 км/ч (рисунок 4) картина носит аналогичный характер до величин зазора 30 мм.

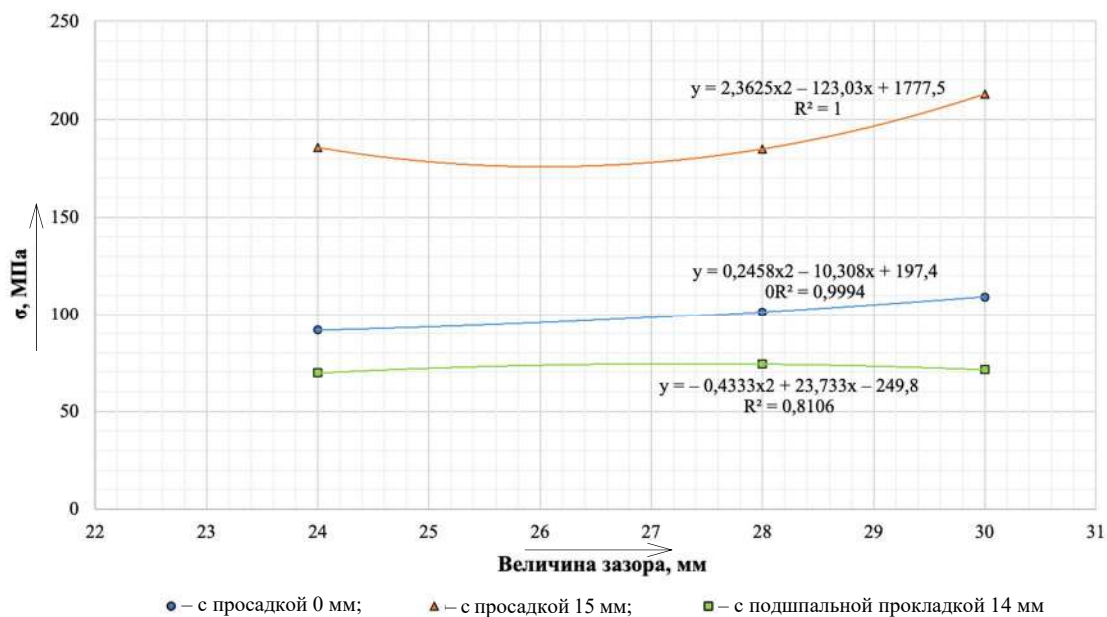


Рисунок 4 – Зависимости напряжений в накладках от величины зазора в стыке на железобетонных шпалах при скорости движения 60 км/ч

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

На рисунках 5 и 6 приведены зависимости напряжений от скорости. Как следует из рисунка 5, увеличение скорости с 25 до 40 км/ч при зазоре 30 мм не приводит к росту напряжений в накладках при наличии упругих прокладок под шпалами. Аналогичная картина имеет место и при зазоре 32 мм (см. рисунок 6).

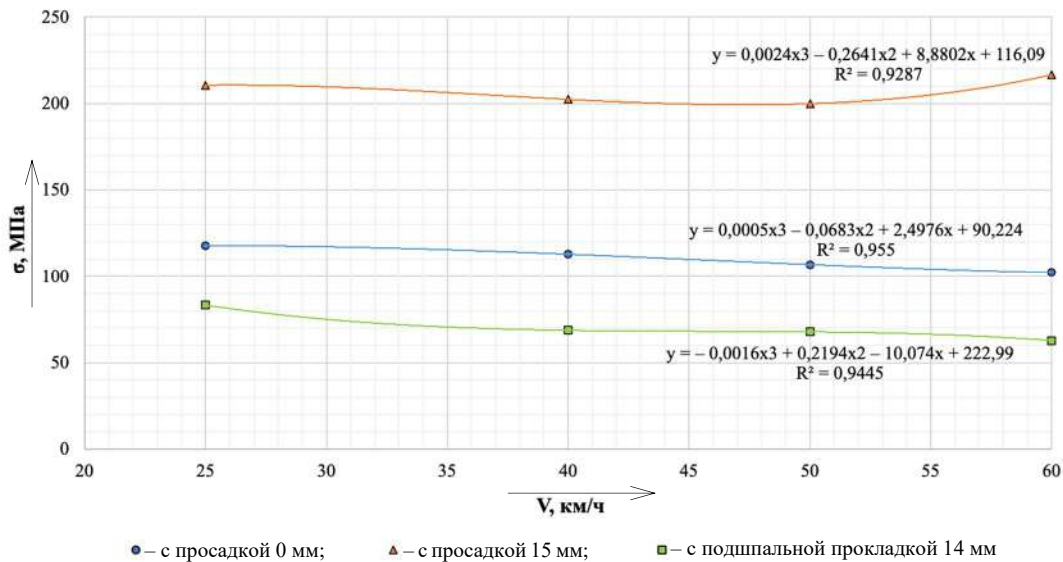


Рисунок 5 – Зависимости напряжений от скорости движения при зазоре в стыке 30 мм на железобетонных шпалах

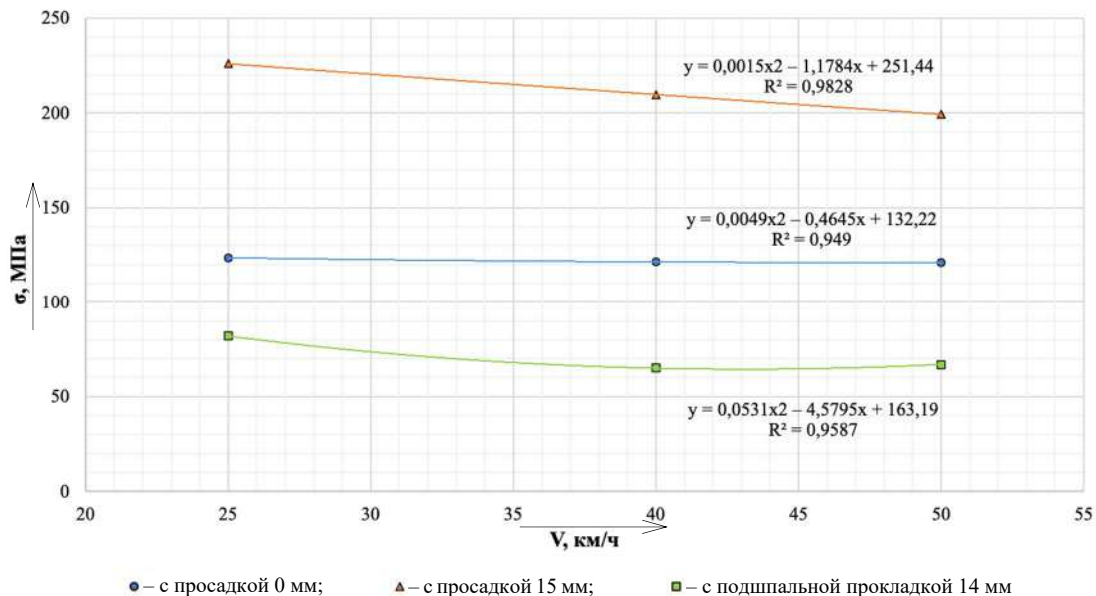


Рисунок 6 – Зависимости напряжений от скорости движения при зазоре в стыке 32 мм на железобетонных шпалах

Таким образом, можно констатировать, что применение упругих прокладок в стыках на железобетонных шпалах позволяет повысить скорость пропуска поездов по зазору в стыке 32 мм до 40 км/ч.

Помимо напряжений были измерены величины ускорений на подошве рельса как один из факторов, влияющих на накопление остаточных осадок пути.

На рисунке 7 представлена диаграмма, которая показывает, что вертикальные ускорения идентичны при конструкции стыка без просадки и в стыке с подшпальной прокладкой при скоростях 50 км/ч с зазорами 30 – 32 мм и скорости 40 км/ч при зазоре 30 – 35 мм. При зазоре

Железнодорожный путь, ИЗЫСКАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

30 мм вертикальные ускорения на подошве рельса при скорости 60 км/ч идентичны ускорениям при скоростях 40 и 50 км/ч.

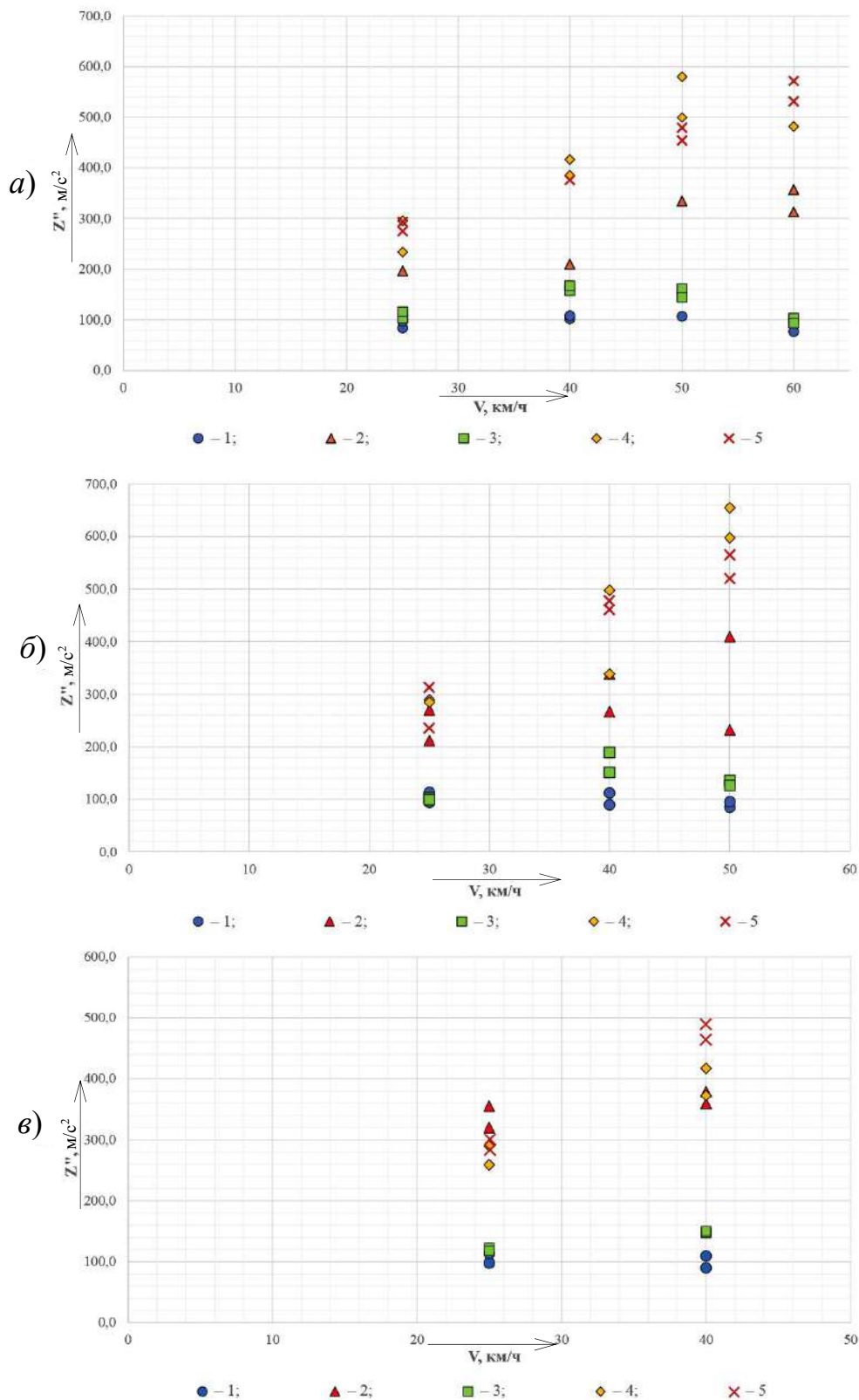


Рисунок 7 – Максимальные значения вертикальных ускорений на подошве рельса, зарегистрированные при проезде опытного стыка грузовым вагоном с различными скоростями движения при определенных вариантах конструкции рельсошпальной решетки (1 – железобетонная шпала с просадкой 0 мм; 2 – железобетонная шпала с просадкой 15 мм; 3 – железобетонная шпала с резиновой подшпальной прокладкой; 4 – деревянная шпала с просадкой 0 мм; 5 – деревянная шпала с просадкой 15 мм):
а – зазор 30 мм; б – зазор 32 мм; в – зазор 35 мм

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Для определения напряжений в шейке рельса в зоне первого стыкового отверстия на рельсе был наклеен тензометрический датчик в виде розетки для измерения вертикальных, горизонтальных и косых (под углом 45°) деформаций. Схема наклейки датчика приведена на рисунке 8.

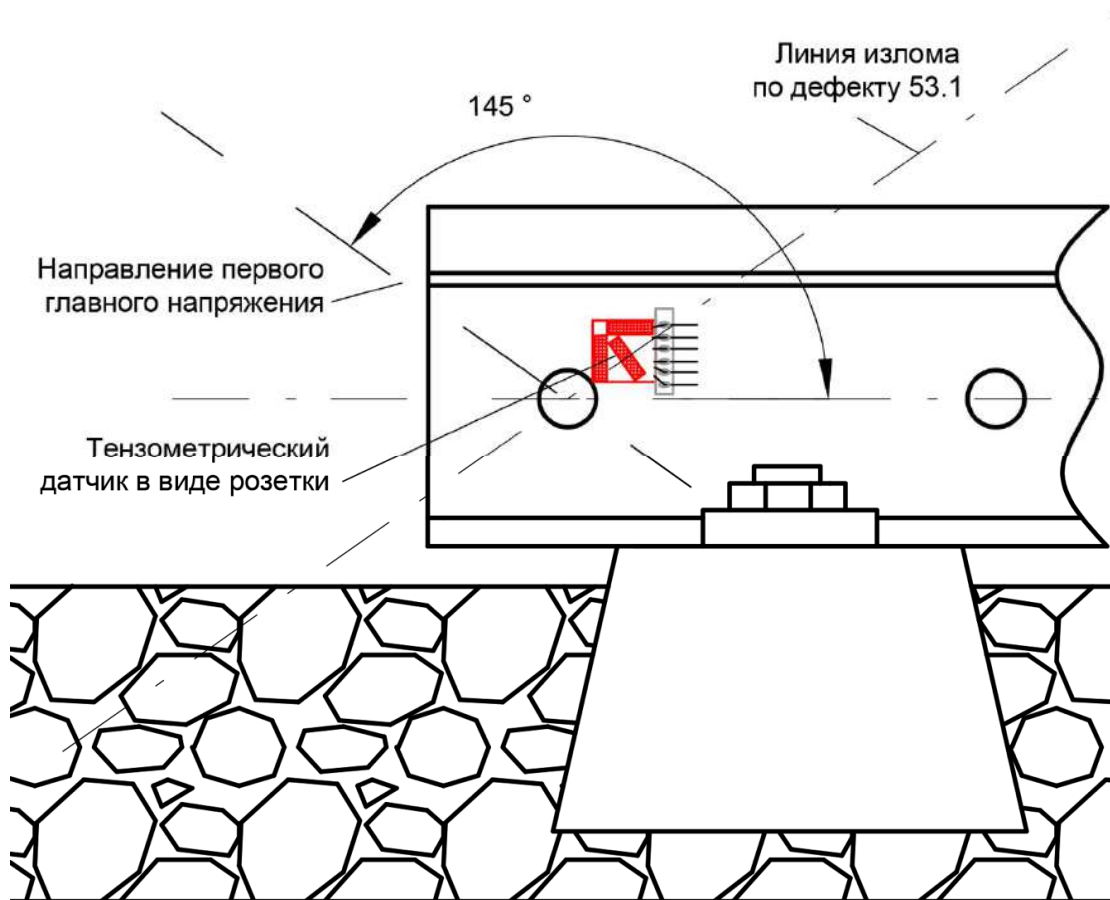


Рисунок 8 – Схема наклейки тензометрического датчика в виде розетки для измерения величин вертикальных, горизонтальных и косых деформаций и направления главных напряжений относительно продольной оси рельса

Результаты обработки опытных данных показали, что величины главных напряжений не превышали 60 МПа, угол направления первого главного напряжения относительно продольной оси рельса при отсчете против часовой стрелки составил 145° . Увеличение главных растягивающих напряжений в зависимости от скорости и величины зазора происходило только при наличии просадки в стыке.

Схема расстановки датчиков измерения на опытном подвижном составе представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Схема расстановки датчиков измерения на опытном подвижном составе

Оценка показателей динамики локомотива при взаимодействии с опытным стыком при всех сочетаниях конструкций пути (типы шпал, подшпальные прокладки), величинах зазора и уровня скоростей движения позволила определить величину коэффициента вертикальной динамики 1-й ступени подвешивания, которая не превышала 0,1 при допустимом по ГОСТ Р 55513–2013 значении 0,35.

Аналогичные результаты по показателям динамики вагона при взаимодействии с опытным стыком: максимальный коэффициент вертикальной динамики на уровне 0,52 при зазоре 35 мм на железобетонных шпалах без просадки (оценка по ГОСТ 33211–2014: 0,5 – отлично; 0,7 – хорошо).

Для проведения исследований были использованы подшпальные прокладки производства ООО «ЭМИРП» толщиной 14 мм, изготовленные из резины на основе изопреновых каучуков, обладающей повышенной морозостойкостью и прошедшей лабораторные испытания [5 – 6].

В результате проведенных испытаний были сделаны следующие выводы.

1. Получены зависимости напряжения в накладках от величины зазора в стыке и скорости движения 25 – 60 км/ч на различных конструкциях верхнего строения пути, позволяющие сделать выводы и рассчитать возможности увеличения скоростей движения по стыкам:

на железобетонных шпалах;

на железобетонных шпалах с просадкой 15 мм;

на железобетонных шпалах с упругими подшпальными прокладками.

2. Величины показателей взаимодействия, измеренные на подвижном составе (вагоне и локомотиве), имеют тенденцию к небольшому росту с повышением скорости, однако превышений нормируемых показателей не зафиксировано при всех величинах зазоров.

3. Наименьшие величины показателей взаимодействия, измеренные на опытном стыке, получены на стыке с железобетонными шпалами и при исправлении просадки 15 мм упругими подшпальными прокладками.

4. Коэффициенты динамики подвижного состава на скоростях 25, 40 км/ч при зазорах 30 – 32 мм показали эффективность применения упругих прокладок под железобетонную шпалу в области стыка.

5. Укладка упругих подшпальных прокладок снижает уровень напряжений в накладках и другие показатели взаимодействия пути и подвижного состава более чем в два раза.

В качестве рекомендации результаты работы были направлены в ОАО «РЖД», а именно: применение упругих подшпальных прокладок в стыках позволяет повысить скорость пропуска поездов при зазоре в стыке 30 – 32 мм до 40 км/ч;

применение упругих прокладок может быть рекомендовано для применения

– в изолирующих стыках;

– в стыках, возникших при восстановлении рельсовых плетей;

– в сварных стыках (в первую очередь при алюмотермитной сварке);

– в стыках уравнительных пролетов.

Данные предложения были учтены при разработке руководства по порядку ограничения скорости движения поездов в зависимости от величины зазора в стыке на основе комплексной оценки работы пути в стыках с учетом просадок и состояния скреплений [7] и утверждены ОАО «РЖД» в установленном порядке в 2023 г.

Список литературы

1. Оценка работы пути, находящегося под воздействием продольных сил при реализации максимальных тяговых режимов при использовании электровозов с асинхронным тяговым приводом / В. О. Певзнер, В. В. Кочергин, В. В. Третьяков [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – Т. 79. – № 4. – С. 209–216. – DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-4-209-216.

2. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути // утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2288/р от 14.11.2016 (в ред. от 29.01.2020 № 157/р). – Москва: ОАО «РЖД». – 2021. – 214 с. – Текст : непосредственный.

3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации // утв. приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022. – Москва : Минтранс, 2022. – 533 с. – Текст : непосредственный.

4. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок / В. О. Певзнер, М. М. Железнов, В. Н. Каплин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 3. – С. 140–146. – DOI <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146>.

5. Каплин, В. Н. Совершенствование конструкции пути с целью снижения интенсивности его расстройств / В. Н. Каплин, К. В. Шапетько, М. Мыслевец. – Текст : непосредственный // РСП Эксперт. – 2019. – № 3. – С. 16–18.

6. Pevzner V., Kaplin V. Improving the Railway Stability in the Joint Zone for Modern Operating Conditions. *Transportation Research Procedia*, 2021, pp. 328-333, DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.079.

7. Руководство по порядку ограничения скорости движения поездов в зависимости от величины зазора в стыке на основе комплексной оценки работы пути в стыках с учетом просадок и состояния креплений // утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 1291/р от 26.05.2023. – Москва : ОАО «РЖД». – 2023. – 7 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Pevzner V.O., Kochergin V.V., Tret'yakov V.V., Kolesnikov K.V., Polunina E.A. Performance assessment of railway track under the impact of longitudinal forces during the implementation of maximum traction modes when using electric locomotives with an asynchronous traction drive. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2020, vol. 79, no. 4, pp. 209-216, DOI 10.21780/2223-9731-2020-79-4-209-216 (In Russian).

2. Instructions for the current maintenance of the railway track // Approved by the Order of JSC «Russian Railways» No. 2288/r dated 14.11.2016 (as amended. dated 29.01.2020 No. 157/r). Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2021. 214 p. (In Russian).

3. Rules of technical operation of railways of the Russian Federation // Approved by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 250 dated 23.06.2022. Moscow, Ministry of Transport Publ., 2022. 533 p. (In Russian).

4. Pevzner V.O., Zheleznov M.M., Kaplin V.N., Tret'yakov V.V., Myslivets M.N., Tomilenko A.S. Increasing track stability in the zone of joints due to the use of elastic under sleeper pads. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Russian Railway Science Journal*, 2016, vol. 75, no. 3, pp. 140-146, <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-3-140-146>. (In Russian).

5. Kaplin V.N., Shapet'ko K. V., Myslevets M. Improving the design of the pathway in order to reduce the intensity of its disorders. *RSP Ekspert – RSP Expert*, 2019, no. 3, pp. 16-18 (In Russian).

6. Pevzner V., Kaplin V. Improving the Railway Stability in the Joint Zone for Modern Operating Conditions. *Transportation Research Procedia*, 2021, pp. 328-333, DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.079.

7. Guidance on the procedure for limiting the speed of trains, depending on the size of the gap in the joint, based on a comprehensive assessment of the work of the track at the joints, taking into account drawdowns and the condition of fasteners // Approved by order of JSC «Russian Railways» No. 1291/r dated 26.05.2023. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2023, 7 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смелянский Игорь Владимирович

ООО «Синара Алгоритм».

Таганская ул., д. 17-23, офис 201, г. Москва, 109147, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, руководитель отдела научных изысканий.

Тел.: +7 (916) 902-12-16.

E-mail: SmelyanskiiIV@sinara-group.com

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Smelyanskiy Igor Vladimirovich

LLC «Sinara Algorithm».

Taganskaya st., 17-23, Moscow, 109147, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the Scientific Research Department.

Phone: +7 (916) 902-12-16.

E-mail: SmelyanskiiIV@sinara-group.com

Третьяков Василий Владимирович

ООО «Синара Алгоритм».
Таганская ул., д. 17-23, офис 201, г. Москва,
109147, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, технический эксперт.
Тел.: +7 (926) 346-51-76.
E-mail: TretyakovVV@sinara-group.com

Tretyakov Vasily Vladimirovich

LLC «Sinara Algorithm».
Taganskaya st., 17-23, Moscow, 109147, the Russian
Federation.
Ph. D. in Engineering, technical expert.
Phone: + 7 (926) 346-51-76.
E-mail: TretyakovVV@sinara-group.com

Коньшков Александр Николаевич

АО «Научно-исследовательский институт же-
лезнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)
3-я Мытищинская ул., д. 10, г. Москва,
129626, Российская Федерация.
Начальник отдела «Транспортная механика»,
НЦ «ТПС».
Тел.: +7 (906) 793-50-81.
E-mail: konyshkov.a@vniizht.ru

Konyshkov Alexander Nikolaevich

Joint Stock Company «Railway Research Institute»
(JSC «VNIIZhT»)
3rd Mytischinskaya st., 10, Moscow, the Russian
Federation.
Head of the department «Transport Mechanics»,
Scientific Center «TRS».
Phone: +7 (906) 793-50-81.
E-mail: konyshkov.a@vniizht.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Смелянский, И. В. Возможность повышения
скорости пропуска поездов при использовании упругих
подшпальных прокладок в стыках / И. В. Смелянский,
В. В. Третьяков, А. Н. Коньшков. – Текст :
непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. –
№ 1 (57). – С. 85 – 94.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Smelyanskiy I.V., Tretyakov V.V., Konyshkov A.N.
The possibility of increasing the speed of passing trains
by using elastic footings in rail joints. *Journal of Transsib
Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 85-94 (In Russian).

УДК: 656.073

З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев, Х. М. Якумбаев

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), г. Ташкент, Республика Узбекистан

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ
НА КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ В УЗБЕКИСТАНЕ**

Аннотация. Статья посвящена корреляционному анализу факторов, влияющих на грузооборот контрейлерных перевозок Республики Узбекистан. Были определены основные факторы, влияющие на грузооборот контрейлерных перевозок, статистическими методами установлена степень их влияния. На основании данных за 10 лет были построены корреляционная матрица и регрессионная модель грузооборота. Полученные результаты позволяют строить прогнозы для грузооборота контрейлерных перевозок на два – четыре года с 95 %-ным доверительным интервалом. Проведенный корреляционный анализ выбранных нами факторов, влияющих на величину грузооборота контрейлерных перевозок, и построение реалистичного уравнения множественной регрессии позволяют сделать следующие выводы:

Грузооборот контрейлерных перевозок

прямо зависит от величины ВВП по транспортным услугам;

обратно зависит от грузооборота автомобильных перевозок, что достаточно очевидно, поскольку автомобильные перевозки являются наиболее сильной альтернативой перевозкам контрейлерным;

прямо зависит от грузооборота железнодорожных перевозок, что также не противоречит логике, поскольку контрейлерные перевозки являются частью перевозок железнодорожных;

обратно зависит (в слабой степени) от протяженности автомобильных дорог с твердым покрытием, что обоснованно, так как по этим дорогам совершаются конкурирующие автомобильные перевозки;

обратно зависят (в слабой степени) от величины внешнеторгового оборота по транспортным услугам, что является нелогичным результатом, объясняющимся, вероятно, слабостью корреляции и малым количеством наблюдений.

Ключевые слова: грузовые перевозки, корреляция, регрессионная модель, транспортный поток, прогноз, матрица.

Ziyoda G. Mukhamedova, Diyor Sh. Boboev, Khamid M. Yakupbaev

Tashkent State Transport University (TSTU), Tashkent, Republic of Uzbekistan

CORRELATION ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING PIGGYBACK TRANSPORTATION IN UZBEKISTAN

Abstract. *The article is devoted to the correlation analysis of factors affecting the cargo turnover of piggyback transportation of the Republic of Uzbekistan. The main factors influencing the cargo turnover of piggyback transportation were identified, the degree of their influence was established by statistical methods. Based on data for ten years, a correlation matrix was built, as well as a regression model of freight turnover. The obtained results make it possible to build forecasts for the cargo turnover of piggyback transportation for 2–4 years with a 95 % confidence interval. The correlation analysis of the factors we selected that influence the volume of piggyback cargo turnover, as well as the construction of a realistic multiple regression equation, allows us to draw the following conclusions:*

Cargo turnover of piggyback transportation

directly depends on the value of GDP for transport services;

depends inversely on the freight turnover of road transport, which is quite obvious, since road transport is the most powerful alternative to piggyback transportation;

directly depends on the freight turnover of rail transportation, which also does not contradict logic, since piggyback transportation is part of rail transportation;

inversely depends (to a weak extent) on the length of paved roads, which is justified, since competing road transport takes place on these roads;

depend inversely (to a weak extent) on the value of foreign trade turnover in transport services, which is an illogical result, probably explained by the weakness of the correlation and the small number of observations.

Keywords: *freight traffic, correlation, regression model, transport stream, forecast, matrix.*

Самыми распространенными видами грузового транспорта в Республике Узбекистан являются автомобильный и железнодорожный. Сети автомобильных и железных дорог являются фундаментом для развития, специализации и концентрации промышленного производства, добычи полезных ископаемых и сельского хозяйства. Кроме того, развитая транспортная инфраструктура способствует выполнению национальной экономикой одной из важнейших и весьма выгодных задач, определенной географическим положением Республики Узбекистан, а именно служить транспортной артерией между Европой и странами Юго-Восточной Азии. Для выполнения этой задачи на территории республики должны быть построены не только новые современные участки автомобильных и железных дорог, но и целые транспортные узлы, контейнерные терминалы и подобная инфраструктура. Кроме того, национальной транспортной системой, в частности, основной железнодорожной компанией республики АО «Узбекистон темир йуллари» (Узбекские железные дороги), должны быть освоены современные логистические технологии, такие как интермодальные перевозки, значимой частью которых являются контейнерные перевозки, характерные черты которых и будут исследованы в настоящей статье.

История контейнерных перевозок по транспортной сети Республики Узбекистан не так длинна и на первом этапе ограничивалась транзитными контейнерными перевозками. Со временем инвестиции в данную сферу экономики позволили оборудовать несколько контейнерных площадок в контейнерных терминалах и на конец 2021 г. такие площадки были построены в 24 % терминалов. Это позволило задействовать даже национальные транспортные компании в контейнерной схеме транспортировки грузов, что привело к уже заметной экономии средств на транспортировку (что давно было доказано успешным опытом контейнерных перевозок в других странах), а также к сокращению углеродного следа отрасли, поскольку углеродный след продукции, перевезенной автотранспортом, в среднем в 83 раза превышает углеродный след продукции, перевезенной железнодорожным транспортом [1, 2].

Годовой грузооборот контейнерных перевозок в Республике Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. представлен на графике (рисунок 1).

Далее рассмотрим факторы, влияющие на величину грузооборота контейнерных перевозок в Республике Узбекистан.

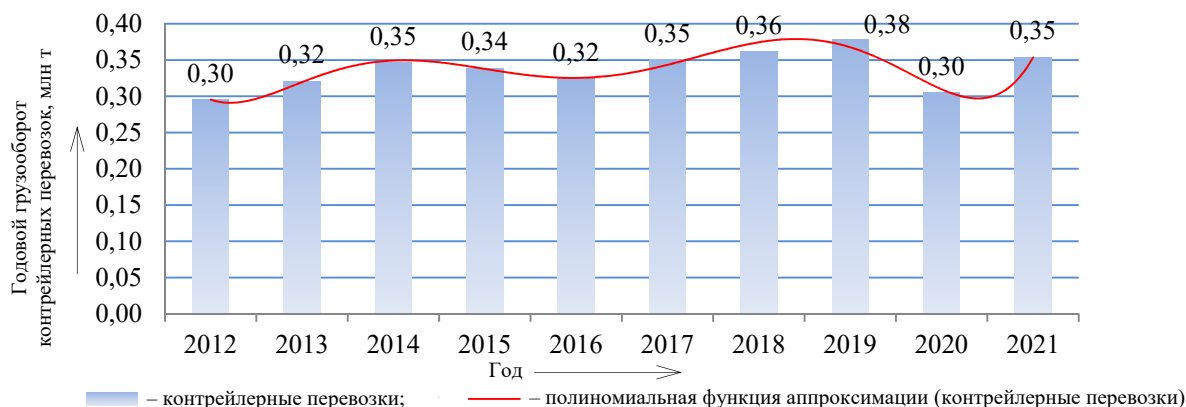


Рисунок 1 – Годовой грузооборот контейнерных перевозок в Республике Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. (Источник: составлено автором на основе данных АО «Узбекистон темир йуллари», 2022)

Поскольку контейнерные перевозки являются перспективными направлениями развития грузового транспорта, то с увеличением ВВП, создаваемого в транспортной отрасли, должен расти грузооборот контейнерных перевозок [3, 5]. Динамика ВВП транспортной отрасли Республики Узбекистан представлена на рисунке 2.

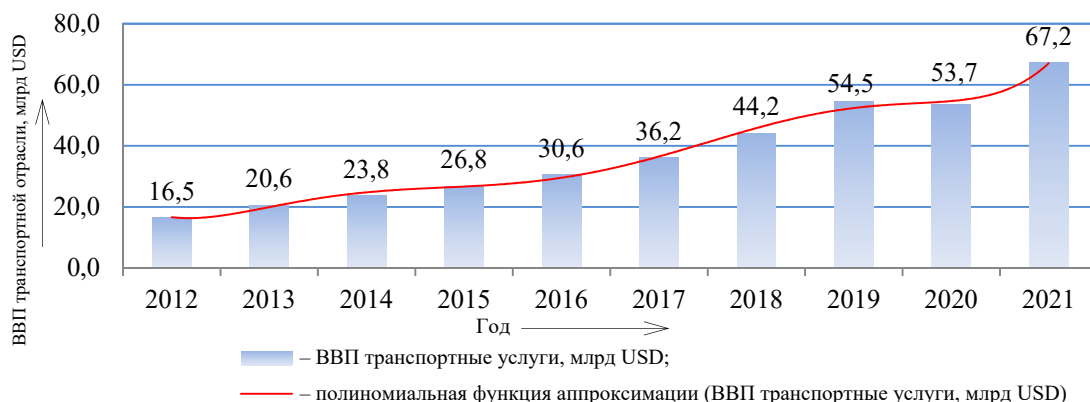


Рисунок 2 – ВВП транспортной отрасли в Республике Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. (Источник: составлено автором на основе данных Государственного комитета по статистике Республики Узбекистан, 2022)

По тем же причинам, что указаны выше, грузооборот контейнерных перевозок, который по определению состоит из автомобильных и железнодорожных перевозок, должен зависеть от величин соответствующих грузооборотов, динамика которых представлена на рисунке 3.

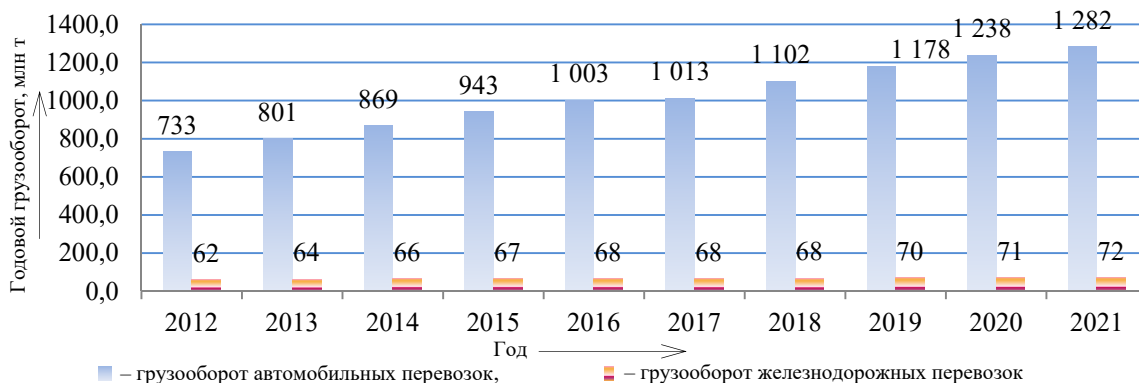


Рисунок 3 – Годовой грузооборот автомобильных и железнодорожных перевозок в Республике Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. (Источник: составлено автором на основе данных Государственного комитета по статистике Республики Узбекистан, 2022)

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

Как было отмечено выше, большую часть контейнерных перевозок в Узбекистане составляют транзитные перевозки. Отсюда следует, что величина грузооборота должна зависеть от величины внешнеторгового оборота республики. Кроме того, поскольку транзитный грузопоток через территорию Республики Узбекистан достаточно велик, логично предположить, что существует связь между величиной контейнерного грузопотока и величиной внешнеторгового оборота по услугам транспортировки [4, 6]. Динамика упомянутых внешнеторговых оборотов представлена на рисунке 4.

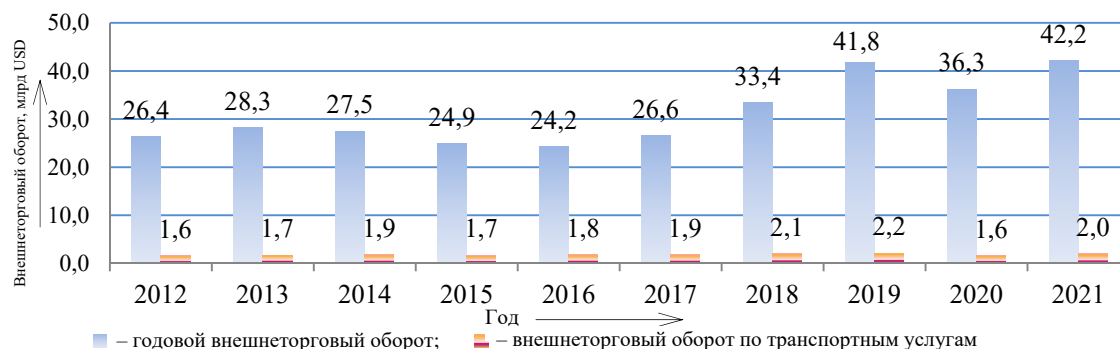


Рисунок 4 – Годовой внешнеторговый оборот и внешнеторговый оборот по транспортным услугам Республики Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. (Источник: составлено автором на основе данных Государственного комитета по статистике Республики Узбекистан, 2022)

Наконец, совершенно очевидно, что любые грузовые перевозки, в том числе контейнерные, прямо зависят от развития как автомобильной, так и железнодорожной дорожной сети Республики Узбекистан (рисунок 5).

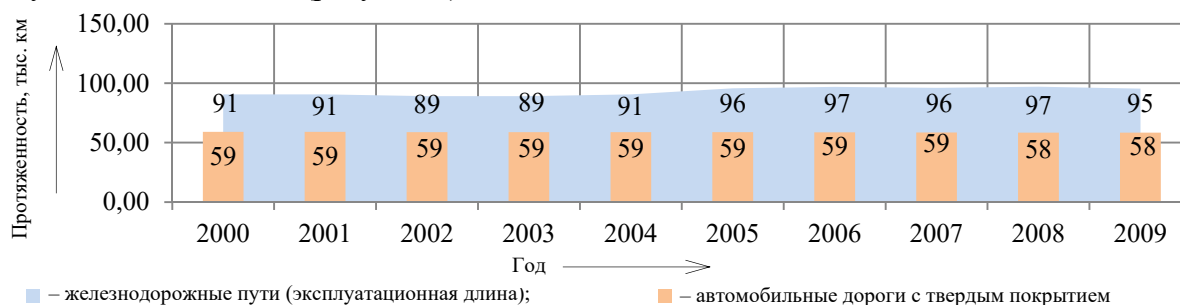


Рисунок 5 – Протяженность железнодорожных путей (эксплуатационная длина) и автомобильных дорог с твердым покрытием Республики Узбекистан за период 2012 – 2021 гг. (Источник: составлено автором на основе данных Государственного комитета по статистике Республики Узбекистан, 2022)

Для дальнейшего исследования методами статистического анализа сведем все анализируемые данные в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные для анализа

Показатель	Переменные	Год										
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Грузооборот контейнерных перевозок, млн т	зависимая переменная	pb	0,30	0,32	0,35	0,34	0,32	0,35	0,36	0,38	0,30	0,35
Грузооборот ж.-д. перевозок, млн т	независимые переменные (регрессоры)	rt	61,5	63,7	65,7	67,2	67,6	67,9	68,4	70,1	70,6	72,0
Грузооборот автомобильных перевозок, млн т		at	733	801	869	943	1003	1013	1102	1178	1238	1282
ВВП транспортных услуг, млрд USD		vt	16,5	20,6	23,8	26,8	30,6	36,2	44,2	54,5	53,7	67,2
Железнодорожные пути, тыс. км		rd	90,6	90,6	89,1	89,1	90,6	95,7	96,9	96,1	97,0	95,5
Автомобильные дороги с твердым покрытием, тыс. км		ad	59,1	59,0	58,7	58,7	58,7	58,9	58,6	58,6	58,5	58,4
Внешнеторговый оборот, млрд USD		vo	90,6	90,6	89,1	89,1	90,6	95,7	96,9	96,1	97,0	95,5
Внешнеторговый оборот по транспортным услугам, млрд USD		vu	59,1	59,0	58,7	58,7	58,7	58,9	58,6	58,6	58,5	58,4

(Источник: составлено автором на основе данных АО «Узбекистон темир йуллари», 2022 и Государственного комитета по статистике Республики Узбекистан 2022)

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

На основе данных таблицы 1 вычислим корреляционную матрицу Спирмена, поскольку число наблюдений, равное 10, недостаточно для построения адекватной корреляционной матрицы Пирсона [7].

Таблица 2 – Корреляционная матрица Спирмена

	pb	vu	vo	ad	rd	vt	at	rt
pb	–							
vu	–0,509	–						
vo	0,295	–0,530	–					
ad	–0,509	1,000	–0,530	–				
rd	0,295	–0,530	1,000	–0,530	–			
vt	0,648	–0,902	0,702	–0,902	0,702	–		
at	0,552	–0,914	0,726	–0,914	0,726	0,988	–	
rt	0,552	–0,914	0,726	–0,914	0,726	0,988	1,000	–

(Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Jamovi)

Из значений коэффициентов корреляции Спирмена следует, что в наибольшей степени зависимая переменная *pb* (грузооборот контрейлерных перевозок, млн т) зависит от переменной (регрессора) *vt* (ВВП транспортных услуг, млрд USD) и коэффициента значимости $p = 0,049 < 0,05$ (95 %-ный доверительный интервал).

Далее по степени зависимости *pb* зависит от переменных *at* (грузооборот автомобильных перевозок, млн т), *rt* (грузооборот ж.-д. перевозок, млн т), для них значение $p = 0,104 > 0,1$ (90 %-ный доверительный интервал).

И, наконец, *pb* достаточно слабо коррелирует с *ad* (автомобильные дороги с твердым покрытием, тыс. км) и *vu* (внешнеторговый оборот по транспортным услугам, млрд USD) при степени значимости $p = 0,133 > 0,1$.

Оставшиеся переменные имеют коэффициенты корреляции с *pb* $< 0,5$, следовательно, они не коррелируют с зависимой переменной.

Сравнивая коэффициенты корреляции независимых переменных между собой, следует отметить высокую степень корреляции и даже полную коллинеарность некоторых переменных (в таблице 2 отмечены заливкой). Это означает, что подобные переменные нельзя рассматривать в качестве независимых регрессоров одновременно [8, 10].

Для более наглядной картины корреляции, в частности, наличие прямой и обратной связи между переменными, следует рассмотреть график плотности распределения для переменных (рисунок 6).

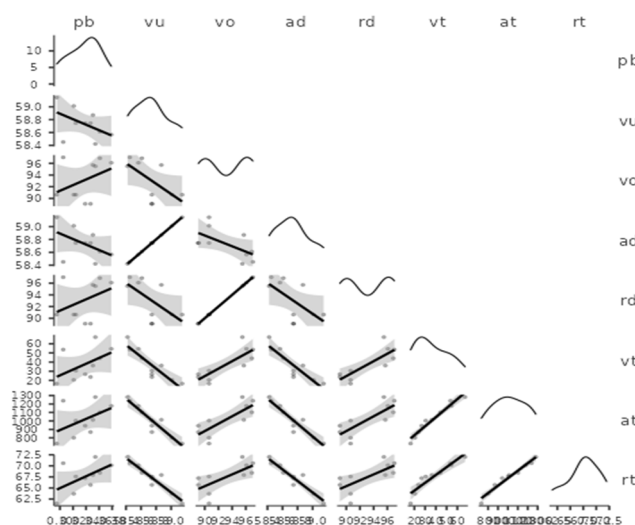


Рисунок 6 – Графики плотности распределения переменных
(Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Jamovi)

Размер областей с заливкой на графиках, приведенных на рисунке 6, позволяет наглядно определить корреляционную связь между парой переменных (о высокой корреляции говорит малая область заливки).

Значения коэффициентов корреляции с вычисленными их значимостями, графики плотности распределения позволяют установить связь между зависимой переменной и факторами влияния, однако более явную связь такого рода можно отметить только при построении регрессионной модели зависимой переменной как функции регрессоров [9, 11].

Прежде чем приступить к построению подобной модели, следует убедиться в стационарности временного ряда для зависимой переменной rb . Для решения этой задачи требуется построить автокорреляционную функцию ACF и частную автокорреляционную функцию PACF в зависимости от лагов (рисунок 7), при этом число лагов не должно быть меньше пяти (половина от числа наблюдений, равного 10).

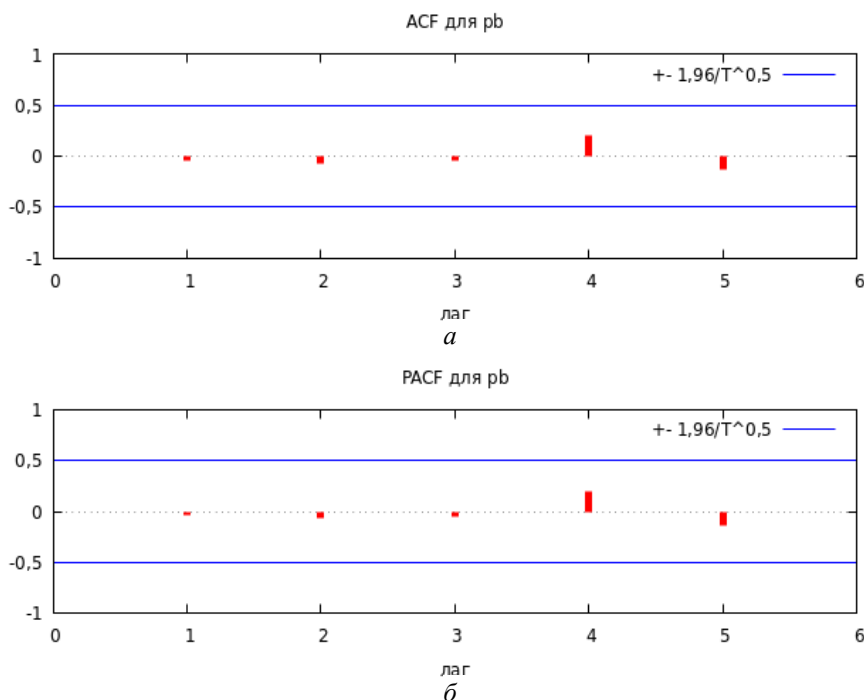


Рисунок 7 – График автокорреляционной функции (частной автокорреляционной функции) в зависимости от лагов (Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

Значения ACF и PACF близки к нулю на интервале от 1 до 5 лагов с небольшим всплеском на четвертом лаге, что объясняется резким спадом и подъемом значений переменной rb в интервале 2020 – 2021 гг. (см. рисунок 1), соответствующими кризису пандемии COVID-19. Впрочем, даже этот всплеск не выходит за критические значения $\pm 1,96/T^{0,5}$ ($T = 10$ наблюдениям), что говорит нам о подтверждении гипотезы о стационарности временного ряда для зависимой переменной rb [12, 13].

Анализ результатов исследований. Построим регрессионную модель методом наименьших квадратов для зависимой переменной rb (таблица 3).

Полученная модель недостаточно адекватно описывает поведение переменной rb . Это утверждение основано прежде всего на p -значении статистики Фишера, большем 0,1 (90 %-ный доверительный интервал). Также неудовлетворительными являются p -значения статистики Студента (Стьюдента) для регрессоров, только два из которых имеют это значение менее 0,1. Это скорее всего связано с наличием гетероскедастичности (неоднородности наблюдений, выражающейся в непостоянной дисперсии случайной ошибки регрессионной модели).

Таблица 3 – Регрессионная модель МНК1

Модель 1: МНК, использованы наблюдения 2012 – 2021 гг. (T = 10)					
Зависимая переменная: pb					
	<i>Коэффициент</i>	<i>Стат. ошибка</i>	<i>t- статистика</i>	<i>P-значение</i>	
const	4,46419	6,64645	0,6717	0,5386	
at	-0,00106408	0,000421920	-2,522	0,0652	*
vt	0,00303548	0,00195071	1,556	0,1947	
rt	0,0359625	0,0137036	2,624	0,0585	*
ad	-0,108604	0,114260	-0,9505	0,3957	
vo	0,00851596	0,00516440	1,649	0,1745	
Среднее зав. перемен.	0,337601	Стат. откл. зав. перемен		0,026022	
Сумма кв. остатков	0,001605	Стат. ошибка модели		0,020031	
R-квадрат	0,736648	Испр. R-квадрат		0,407458	
F(5, 4)	2,237760	P-значение (F)		0,227614	
Лог. правдоподобие	29,49675	Крит. Акаике		-46,99351	
Крит. Шварца	-45,17800	Крит. Хеннана – Куинна		-48,98512	
Параметр rho	-0,130545	Стат. Дарбина – Вотсона		2,215015	
Тест Бриша – Пэгана (Breusch – Pagan) на гетероскедастичность					
Нулевая гипотеза: гетероскедастичность отсутствует					
Тестовая статистика: LM = 4,05887					
p-значение = P(хи-квадрат (5) > 4,05887) = 0,540972					
Тест Бриша – Пэгана (Breusch – Pagan) на гетероскедастичность (робастный вариант)					
Нулевая гипотеза: гетероскедастичность отсутствует					
Тестовая статистика: LM = 6,76632					
p-значение = P(хи-квадрат (5) > 6,76632) = 0,238607					

(Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

Однако оба теста Бриша – Пэгана не указывают на наличие гетероскедастичности. Это возможное противоречие может быть объяснено присутствием некоторой гетероскедастичности, выявляемой механизмом вспомогательной регрессии высших степеней (больших, чем вторая степень) остатков, которые тест не учитывает. Более общий тест Уайта провести не удастся, поскольку количество переменных очень велико для такого малого количества наблюдений. Впрочем, в статистическом пакете Gretl существует механизм построения МНК-модели с поправкой на гетероскедастичность (таблица 4).

Таблица 4 – Регрессионная модель МНК2

Модель 2: С поправкой на гетероскедастичность, использованы наблюдения 2012 – 2021 гг. (T = 10)					
Зависимая переменная: pb					
	<i>Коэффициент</i>	<i>Стат. ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-значение</i>	
const	-1,03448	0,235028	-4,402	0,0046	***
at	-0,000831607	0,000185463	-4,484	0,0042	***
vt	0,00456540	0,00124500	3,667	0,0105	**
rt	0,0303216	0,00552823	5,485	0,0015	***
Статистика, полученная по взвешенным данным:					
Сумма кв. остатков	8,415709	Стат. ошибка модели		1,184322	
R-квадрат	0,891867	Испр. R-квадрат		0,837801	
F(3, 6)	16,49575	P-значение (F)		0,002651	
Лог. правдоподобие	-13,32696	Крит. Акаике		34,65392	
Крит. Шварца	35,86426	Крит. Хеннана – Куинна		33,32618	
Параметр rho	0,513849	Стат. Дарбина – Вотсона		0,982780	

(Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

Данная модель по p -значениям удовлетворяет критерию $< 0,05$ для всех переменных, зависимых и независимых, R -квадрат достаточно близок к единице, а критерии логарифмического правдоподобия, Акаике, Шварца и Хеннана – Куинна по модулю меньше 100, что косвенно подтверждает адекватность модели. Впрочем, величина статистики Дарбина – Вотсона < 1 говорит о присутствии некоторой автокорреляции первого порядка, но подобный результат не должен слишком смущать, поскольку он свойственен рядам с небольшим количеством наблюдений [14].

Подтверждением адекватности модели служат график наблюдаемых и расчетных значений переменной pb (рисунок 8) и коррелограмма остатков (рисунок 9).



Рисунок 8 – График наблюдаемых и расчетных значений переменной pb (Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

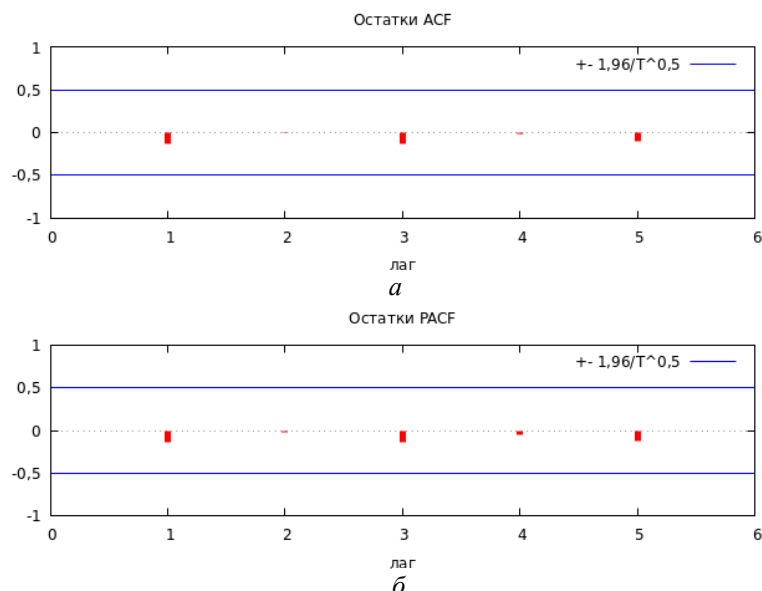


Рисунок 9 – Коррелограмма остатков (Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

Значения и критерии, представленные в таблице 4, внешний вид графиков рассчитанных и наблюдаемых значений на рисунке 8, а также коррелограмма остатков на рисунке 9 (отсутствие всплесков, локализация ACF и PACF вблизи 0) говорят о достаточной реалистичности построенной модели, выраженной в виде уравнения регрессии:

$$pb = -1,03 - 0,000832 \cdot at + 0,00457 \cdot vt + 0,0303 \cdot rt.$$

Прогноз грузооборота контейнерных перевозок на три года, вычисленный с помощью приведенного уравнения, представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Прогноз грузооборота контейнерных перевозок на период 2022 – 2024 гг. для 95 %-ного доверительного интервала $z(0,025) = 1,96$

Год	Предсказание величины грузооборота, млн т	Стат. ошибка	95 %-ный доверительный интервал
2022	0,42	0,0114	(0,394 – 0,438)
2023	0,37	0,0170	(0,339 – 0,406)
2024	0,34	0,0187	(0,300 – 0,373)

(Источник: рассчитано автором с помощью статистического пакета Gretl)

Тот же результат представлен визуально на графике (рисунок 10).

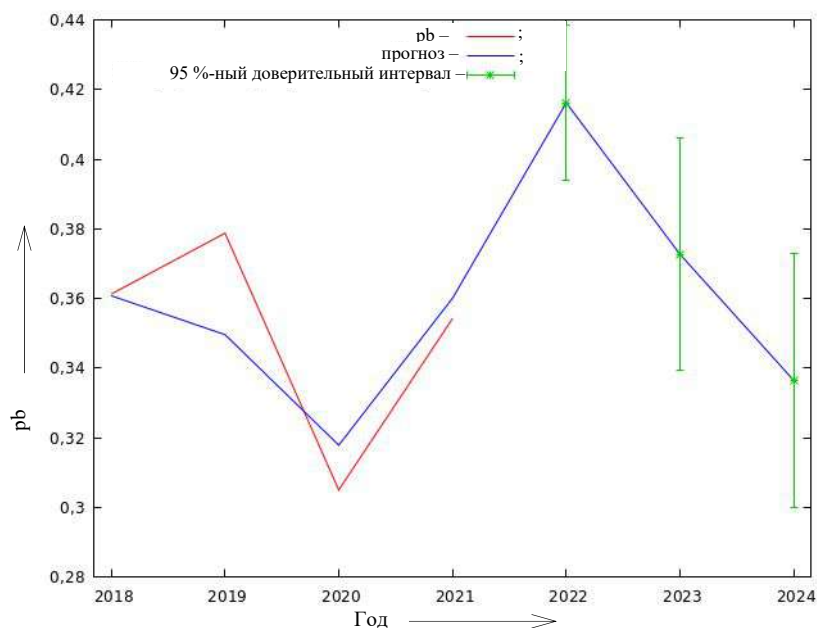


Рисунок 10 – Прогноз грузооборота контейнерных перевозок на период 2022 – 2024 гг., млн т

Проведенный корреляционный анализ выбранных нами факторов, влияющих на величину грузооборота контейнерных перевозок, а также построение реалистичного уравнения множественной регрессии (приведено выше) позволяет сделать следующие выводы о том, что грузооборот контейнерных перевозок

прямо зависит от величин ВВП по транспортным услугам;

обратно зависит от грузооборота автомобильных перевозок, что достаточно очевидно, поскольку автомобильные перевозки являются наиболее сильной альтернативой перевозкам контейнерным (интересно отметить, что корреляционный анализ показывает прямую зависимость, но более точное уравнение множественной регрессии, приведенное выше, показывает зависимость обратную);

прямо зависит от грузооборота железнодорожных перевозок, что также не противоречит логике, поскольку контейнерные перевозки являются частью перевозок железнодорожных;

обратно зависит (в слабой степени) от протяженности автомобильных дорог с твердым покрытием, что обоснованно, так как по этим дорогам совершаются конкурирующие автомобильные перевозки;

обратно зависит (в слабой степени) от величины внешнеторгового оборота по транспортным услугам, что является нелогичным результатом, объясняющимся, вероятно, слабостью корреляции и малым количеством наблюдений.

Таким образом, строя прогнозы развития контейнерных перевозок в Республике Узбекистан, следует учитывать степень и направленность влияния выбранных нами факторов.

Список литературы

1. Годовой отчет АО «Узбекистон темир йуллари» // railway.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://railway.uz/ru/proekty/9018/> / дата ввода 12.12.2022 (дата обращения: 05.02.2024).
2. Государственный комитет по статистике Республики Узбекистан // stat.uz : сайт. – Текст: электронный. – URL: <https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/national-accounts/> / дата ввода 12.12.2022 (дата обращения: 05.02.2024).
3. Mukhamedova Z. & Fayzibaev S. & Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *IP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.
4. Мухамедова, З. Г. К вопросу о развитии транспортной инфраструктуры Узбекистана / З. Г. Мухамедова, З. В. Эргашева, Э. А. Асатов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 2 (46). – С. 105–114.
5. Mukhamedova Z. Analysis and assessment of power efficiency of special self – propelled railway rolling stock. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2020, 12(2), pp. 2808-2814.
6. Mukhamedova Z.G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.
7. Diomin Y.V. & Diomin R.Y. Procedural issues acceptance of rolling stock gauge 1435/1520 mm. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 2013, pp.119-124.
8. Бобоев, Д. Ш. Практическое совершенствование контейлерных транспортировок / Д. Ш. Бобоев, Ш. С. Файзибаев, З. Г. Мухамедова. – Текст : непосредственный // Беларусь-Узбекистан: формирование рынка инновационной продукции : сборник материалов научно-практической конференции / Белорусский нац. техн. ун-т. – Минск, 2023. – С. 308–311.
9. Мухамедова, З. Г. Исследования по улучшению современной транспортной системы в процессе доставки грузов / З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации. – 2022. – № 1. – С. 15–24 (на узбекском языке).
10. Jamol Shihnazarov & Diyor Boboev & Mirali Dehkonov & Diyora Ikramova. Choice of an efficient mode of transport on the basis of comparison of technical and economic indicators of types of transport. Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2023). *E3S Web of Conferences* 389, 05032 (2023).
11. Russo F.U. Sansone The terminal cycle time in road-rail combined transport. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2021, vol. 186, pp. 875-886.
12. Bortas I. & Brnjac N. & Dundovic C. Transport routes optimization model through application of fuzzy logic. *Promet – Traffic&Transportation*, 2018, vol. 30 (1), pp. 121-129.
13. Boschian V. & Dotoli M. & Pia Fanti M. & Iacobellis Go, W. & Ukovich W. A metamodelling approach for performance evaluation of intermodal transportation networks. *European Transport*, 2020, vol. 46, pp. 100-113.
14. Boboev D.Sh. & Bozorov R.Sh. & Shermatov E.S. Choose types of transport and improve their cooperation in the process of delivery of cargo // Экономика и социум. – 2021. – № 6 (85). – Текст : электронный. – URL: https://www.iupr.ru/_files/ugd/b06fdc_6db887c33a6c4a1f8f423d69f87315a4.pdf?index=true (дата обращения: 05.02.2024).

References

1. *Godovoi otchet AO «Uzbekiston temir iullari»* [Annual Report of Uzbekistan Temir Yullari JSC]. Available at: <https://railway.uz/ru/proekty/9018/> / date of entry 12.12.2022 (accessed 05.02.2024).
2. *Gosudarstvennyi komitet po statistike Respubliki Uzbekistan* [State Committee on Statistics of the Republic of Uzbekistan]. Available at: <https://stat.uz/ru/ofitsialnaya-statistika/national-accounts> / date of entry 12.12.2022 (accessed 05.02.2024).
3. Mukhamedova Z. & Fayzibaev S. & Ergasheva Z. Improving the Design Concepts of Equipment for the Assembly Platform of a Rail Service Car Considering Reliability Rates and Real State. *IP Conference Proceedings*, 2022, 2432, 030052.

4. Muhamedova Z.G., Ergasheva Z.V., Asatov E.A. On the development of transport infrastructure in Uzbekistan. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 2 (46), pp. 105-114 (In Russian).

5. Mukhamedova Z. Analysis and assessment of power efficiency of special self – propelled railway rolling stock. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2020, 12(2), pp. 2808-2814.

6. Mukhamedova Z.G. Modelling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53.

7. Diomin Y.V. & Diomin R.Y. Procedural issues acceptance of rolling stock gauge 1435/1520 mm. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 2013, pp.119-124.

8. Boboyev D.Sh., Fayzibaev Sh.S., Muhamedova Z.G. [Practical improvement of container transportation]. *Belarus'-Uzbekistan: formirovanie innovatsionnogo rynka: sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Belarus-Uzbekistan: formation of an innovative market: collection of materials of the scientific and practical conference]. Minsk, 2023, pp. 308-311 (In Russian).

9. Muhamedova Z.G., Boboev D.Sh. Study of improvement of modern transportation system in the process of delivery of goods. *Zheleznodorozhnyi transport: aktual'nye zadachi i innovatsii – Railway transport: topical issues and innovations*, 2022, no. 1, pp. 15-24 (In Uzbek).

10. Jamol Shihnazarov & Diyor Boboev & Mirali Dehkonov & Diyora Ikramova. Choice of an efficient mode of transport on the basis of comparison of technical and economic indicators of types of transport. Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2023). *E3S Web of Conferences* 389, 05032 (2023).

11. Russo F.U. Sansone The terminal cycle time in road-rail combined transport. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2021, vol. 186, pp. 875-886.

12. Bortas I. & Brnjac N. & Dundovic C. Transport routes optimization model through application of fuzzy logic. *Promet – Traffic&Transportation*, 2018, vol. 30 (1), pp. 121-129.

13. Boschian V. & Dotoli M. & Pia Fanti M. & Iacobellis Go, W. & Ukovich W. A metamodelling approach for performance evaluation of intermodal transportation networks. *European Transport*, 2020, vol. 46, pp. 100-113.

14. Boboev D.Sh. & Bozorov R.Sh. & Shermatov E.S. Choose types of transport and improve their cooperation in the process of delivery of cargo. *Ekonomika i sotsium – Economy and society*, 2021, no. 6 (85). Available at: https://www.iupr.ru/_files/ugd/b06fdc_6db887c33a6c4a1f8f423d69f87315a4.pdf?index=true (accessed 05.02.2024).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Доктор технических наук, и. о. профессора кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТРУ.

Тел.: +998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Бобоев Диёр Шомуротович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТРУ.

Тел.: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctor of Sciences in Engineering, acting professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Boboev Diyor Shomurotovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 414-18-03.

E-mail: diyor1803boboyev@gmail.com

Якупбаев Хамид Маратович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ).

Темирийўлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Докторант кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТрУ.

Тел.: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

Yakupbaev Khamid Maratovich

Tashkent State of Transport Universitet (TSTU).

1st House of Temiryulchilar street of Tashkent City, 100060, Republic of Uzbekistan.

Doctoral student of the department «Transport cargo system», TSTU.

Phone: +998 (90) 006-18-36.

E-mail: xamidjon19962303@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. Корреляционный анализ факторов, влияющих на контрейлерные перевозки в Узбекистане / З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев, Х. М. Якупбаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 94 – 105.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z.G., Boboev D.Sh., Yakupbaev Kh.M. Correlation analysis of factors affecting piggyback transportation in Uzbekistan. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 94-105.

УДК 656.073

Е. А. Петренива

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

КОНТРЕЙЛЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ КАК МЕТОД ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Аннотация. Особенности географического положения и сложный климат в России повлияли на распространенность видов транспорта, и лидирующие места традиционно занимают железнодорожный и автомобильный. Текущая ситуация на рынке в области транспортного сервиса и высокий уровень конкуренции предполагают исследование возможности разработки и реализации альтернативного способа перевозок железной дорогой во взаимодействии с автотранспортом. Такая вариация перевозки даст возможность организации доставки «от двери до двери», используя преимущество каждого вида транспорта, и улучшит качество логистического сервиса, что особенно актуально в настоящее время. При комбинации этих видов транспорта надежность, скорость и высокая провозная способность железной дороги сочетаются с маневренностью и оперативностью автомобильного транспорта.

В постсоветские годы после перехода страны от командной экономики к рыночным отношениям появилось большое количество мелких и средних компаний, занимающихся торгово-посредническими операциями, и доля перевозок тарно-штучных грузов возросла. Автомобильный транспорт за счет своей доступности и простоты процесса перевозки все больше вытесняет своих конкурентов – водный, железнодорожный и воздушный транспорт. Данные факторы предполагают внедрение логистического подхода в организации перевозок тарно-штучных грузов.

В данной статье проведен сравнительный анализ вариантов доставки тарно-штучного груза, не требующего особых условий перевозки, определены основные проблемы реализации контрейлерного движения и даны рекомендации по их решению. Логистический подход предполагает высокий уровень согласованности действий всех звеньев транспортно-логистической цепи, обеспечение жесткого контроля за товарно-денежными потоками, поиск путей сокращения затрат, не ведущих к снижению качества оказываемых услуг, а также упрощение процесса оформления таможенных, перевозочных и прочих видов документации. На основании выделенных критериев эффективности контейнерных перевозок рассмотрены перспективные направления организации контрейлерного движения в России.

Ключевые слова: контрейлерные перевозки, железнодорожный транспорт, контейнерный поезд, грузовой экспресс, логистика, грузовое сообщение.

Elena A. Petreneva

Siberian State Transport University (SSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

PIGGYBACK TRANSPORTATION AS A METHOD OF LOGISTIC APPROACH

Abstract. The peculiarities of the geographical location and the difficult climate in Russia have influenced the prevalence of modes of transport, and railway and automobile traditionally occupy the leading places. The current market situation in the field of transport services and the high level of competition suggest exploring the possibility of developing

and implementing an alternative method of transportation by rail in cooperation with motor transport. Such a variation of transportation will make it possible to organize door-to-door delivery, taking advantage of each type of transport, and improve the quality of logistics service, which is especially important at the present time. When combining these modes of transport, the reliability, speed and high carrying capacity of the railway are combined with the maneuverability and efficiency of road transport.

In the post-Soviet years, after the country's transition from a command economy to market relations, a large number of small and medium-sized companies engaged in trade and intermediary operations appeared, and the share of transportation of packaged goods increased. Due to its accessibility and simplicity of the transportation process, road transport is increasingly displacing its competitors - water, rail and air. These factors suggest the introduction of a logistic approach in the organization of transportation of packaged goods.

In this article, a comparative analysis of the options for the delivery of single-piece cargo that does not require special transportation conditions is carried out, the main problems of implementing contrailer traffic are identified and recommendations are given to reduce them. The logistics approach assumes a high level of coordination of actions of all links of the transport and logistics chain, ensuring strict control over commodity and cash flows, finding ways to reduce costs that do not lead to a decrease in the quality of services provided, as well as simplifying the process of customs clearance, transportation and other types of documentation. Based on the selected criteria for the effectiveness of container transportation, promising directions for the organization of piggyback traffic in Russia are considered.

Keywords: piggyback transportation, rail transport, container train, freight express, logistics, freight communication.

В сложившейся ситуации, при которой на автомобильном транспорте наблюдается низкий уровень дорожного покрытия и объектов инфраструктуры на некоторых участках путей сообщения, переориентация доли грузов на железную дорогу является оправданной. Пониженное качество автодорог страны в связи с сильным износом часто способствует увеличению затрат на автомобильные перевозки груза до полутора раз.

С точки зрения экономики взаимодействие железной дороги и автомобильного транспорта может быть вполне эффективным решением как для грузовладельцев, нуждающихся в обеспечении качественных и надежных перевозок, так и для автотранспортных предприятий, стремящихся к развитию коммерческой деятельности. Подходящим вариантом выгодного взаимодействия при перевозке тарно-штучных грузов является контрейлерная перевозка.

В настоящее время в России существует большое количество предпосылок к внедрению контрейлерных перевозок на постоянной основе, среди которых есть законодательные, экономические, инфраструктурные, технологические, географические.

В тарифное руководство уже внесены данные по платам за контрейлерные перевозки груженых и порожних автопоездов, полуприцепов и съемных кузовов автомобилей. Для наглядности изменения повышения тарифа от тарифного расстояния данные представлены в виде графика на рисунке 1.

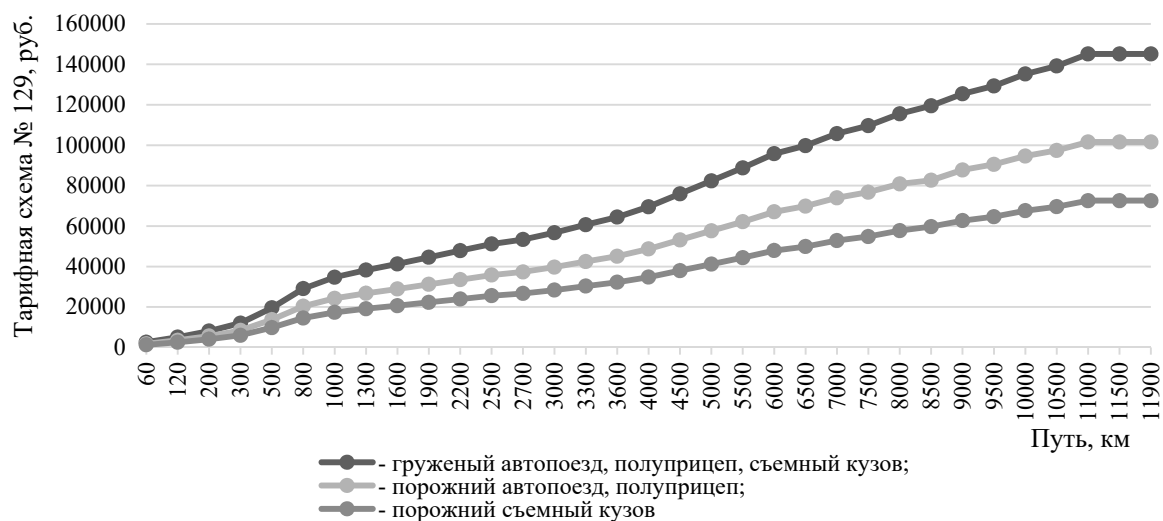


Рисунок 1 – Плата за перевозку грузов в автопоездах, полуприцепах и съемных кузовах в груженом и порожнем видах

Из приведенного графика видно, что наибольший рост цены идет до отметки «1000 км», далее нарастающий итог постепенно снижается, а после пересечения точки «11000 км» плата за перевозку становится постоянной. Такая зависимость связана с величиной постоянных издержек.

Одним из методов стратегического планирования является SWOT-анализ, базирующийся на определении факторов внутренней и внешней среды какого-либо объекта. Разделение этих факторов в области контрейлерных перевозок представлено в таблице 1.

Таблица 1 – SWOT-анализ контрейлерных перевозок в России

	Сильные стороны (STRENGTHS)	Слабые стороны (WEAKNESS)
Внутренняя среда	<ol style="list-style-type: none"> 1) Совмещает в себе сильные стороны железнодорожного и автомобильного транспорта 2) Возможность перевозки грузов на дальние расстояния 3) Возможность доставки груза в условиях ограниченного автомобильного (экологические запреты, плата за проезд по трассе, отсутствие автодорог или их плохое состояние) и железнодорожного (горная местность) движения 4) Относительно низкая зависимость от погодных условий 5) Возможность доставки в мелкие населенные пункты 6) Снижение уровня загрязнения окружающей среды 7) Повышение сохранности автодорожного полотна 8) Снижение вероятности ДТП 9) Уменьшение расходов автомобильного топлива и пробега (экономия ресурса) 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Нехватка специализированного подвижного состава 2) Дополнительная оплата за пользование специализированным подвижным составом 3) Относительно высокая стоимость перевозки 4) Необходимость перевозки (подбора) водителей 5) Отсутствие контрейлерных терминалов 6) Низкий коэффициент использования грузоподъемности платформ
Внешняя среда	Возможности (OPPORTUNITIES)	Угрозы (THREATS)
	<ol style="list-style-type: none"> 1) Низкое качество автодорог 2) Переход клиентов с автотранспорта из-за роста стоимости перевозок (система «Платон», рост цен на топливо) 3) Климатические и географические особенности 4) Ограничение рабочего времени водителей на автотранспорте 5) Наличие зон с постоянно затрудненным движением автотранспорта 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Отсутствие инвестиций и господдержки 2) Конкурентное давление автотранспорта 3) Изменение законодательной базы в области транспорта 4) Сезонные колебания спроса на услугу 5) Недоверие автоперевозчиков к новой услуге 6) Лояльная к автомобильному транспорту политика государства в области экологии и эксплуатации инфраструктуры

В ходе анализа установлено, что для успешного применения контрейлерных перевозок в России требуется проведение комплекса мер, охватывающих разные аспекты: технические, технологические, организационные и нормативно-правовые [1].

Что касается организации контрейлерного движения в России с технической стороны, то для предоставления автовладельцам и грузовладельцам разнообразных транспортно-логистических услуг и качественного сервиса целесообразно обеспечить терминалы всем необходимым для времяпрепровождения и отдыха водителей, оборудовать специальными погрузочно-разгрузочными механизмами, модернизировать специализированный подвижной состав для контрейлерных перевозок. Проще всего реализовать данные мероприятия путем совмещения контрейлерной площадки с имеющимися контейнерными терминалами.

С технологической стороны следует тщательно прорабатывать графики движения поездов с учетом сезонности. Предполагается, что наибольший спрос на контрейлерные перевозки будет приходиться на холодное время года и сезон дождей, когда дороги будут размыты. Кроме того, должна быть организована система консолидации на терминалах, что особенно актуально для тарно-штучных грузов.

С позиции нормативно-правового обеспечения контрейлерных перевозок необходима разработка тарифов и правил перевозки.

При наличии инвесторов и государственной поддержки данный проект можно считать перспективным за счет достижения синергетического эффекта.

Комбинированные перевозки давно показали на практике удобство и эффективность применения. Мировой опыт показывает, что наиболее распространенными вариантами в настоящее время являются контейнерные и контрейлерные перевозки, а стоимость их реализации примерно одинакова, однако в России распространение получили лишь первые.

Зампредседателя Некоммерческого партнерства операторов железнодорожного подвижного состава Денис Семенкин выделяет несколько направлений организации контрейлерного движения: «В первую очередь, это места, где есть сложности с перевозкой грузов автотранспортом, и пограничные зоны. Например, на российско-финской границе, где образуются километровые очереди из грузовиков. Либо на тех территориях Российской Федерации, где нет нормальных условий для проезда автотранспорта по причине природного, погодного характера» [2].

Можно выделить несколько параметров, при которых контрейлерные перевозки будут эффективными:

- значительная протяженность маршрута;
- наличие некачественных автодорог по маршруту;
- наличие размытых дорог в межсезонье;
- наличие горной местности, по которой не проходит железная дорога;
- пограничные районы.

С учетом данных критериев несложно предположить, что организация контрейлерных грузоперевозок является одним из наилучших вариантов ускорения таможенных процедур на пограничных переходах со странами Прибалтики, пограничных переходах с Финляндией, в Благовещенске, а в Ханты-Мансийском округе и Якутской области – из-за отдаленности от районов производства и сложных климатических условий. Также целесообразно отдавать предпочтение контрейлерным перевозкам грузов в Республике Коми, Томской области, Дальневосточном регионе, Якутской области, Пермском крае по причине плохо развитой автомобильной сети, а в связи с отсутствием железной дороги – в Республике Тыва и Республике Алтай [3].

Как было определено ранее, контрейлерные перевозки имеют ряд преимуществ по сравнению с другими способами транспортировки. Наиболее универсальным и эффективным транспортным модулем зарекомендовал себя крупнотоннажный контейнер. Один из вариантов контейнерной доставки является погрузка контейнера на полуприцеп с тягачом с дальнейшей постановкой всех элементов на железнодорожную платформу.

Новосибирск исторически с момента возникновения выступает крупным транспортным распределительным центром. В настоящее время Новосибирская область представляет собой крупнейший транспортный узел Сибири, связывающий десятки городов Сибири, Алтая, Кузбасса и некоторых городов Средней Азии и Казахстана.

Транспортный комплекс области располагает локальными центрами накопления, обработки и распределения грузовых и пассажирских потоков с комплексами складских и таможенных терминалов, железнодорожных станций-терминалов, вокзалов, аэропортов, вследствие чего выполняет функции концентрирующего и распределяющего узла.

В Новосибирской области расположены крупные инфраструктурные объекты, зона влияния которых выходит далеко за пределы Новосибирской области, такие как аэропорт Толмачево, крупнейшие контейнерные станции К, И и многие другие.

Значительная доля грузов из Новосибирска отправляется на Дальний Восток, и самый распространенный способ транспортировки при этом – контейнерный. Одной из основных стратегических целей России является развитие экономики в Дальневосточном и Сибирском регионах, чему способствует активное участие страны в интеграционных процессах Азиатско-Тихоокеанского региона, особенно наблюдается взаимодействие с соседскими провинциями Китайской Народной Республики [4].

Так как грузы, перевозимые в контейнерах, являются потенциальными контейнерными грузами, на основе статистических данных ПАО «ТрансКонтейнер» за последний год были проанализированы грузопотоки контейнеро- и контейнеропригодных грузов по Новосибирской области, отправляемых до станции X.

Чтобы определить центр тяготения всех грузопотоков, можно воспользоваться методом определения центра тяжести. Данный метод широко применяется в логистике для определения расположения дистрибутивных складов, центров консолидации и распределения или заводов.

Суть данного метода заключается в сокращении издержек на транспортировку груза путем определения географических координат точки, расположенной между уже существующими объектами практически на одинаковом расстоянии.

Для реализации данного метода следует нанести на географическую координатную сетку месторасположение железнодорожных станций, с которых отправляются контейнеро-пригодные грузы. Координаты объектов при этом будут соответствовать координатам на карте.

Вычисление средневзвешенных координат производится по формулам:

$$x_{cp} = \sum x_i V_i / V_i;$$

$$y_{cp} = \sum y_i V_i / V_i,$$

где x – горизонтальная координата в точке i ; y – вертикальная координата в точке i ; V_i – объем контейнеропригодных грузов, отправляемых из точки i [5].

После предварительного суммирования общего объема грузов за год до станции X определили координаты железнодорожных станций и объемы грузов, отправляемых с этих станций, соответственно выяснили координаты точки, в которой было бы выгоднее всего накапливать грузы. Эта точка соответствует расположению железнодорожной станции И. Однако данная станция является достаточно загруженной, поэтому предлагается накапливать контейнеры на станции М, а отправлять со станции И в составе «грузового экспресса». Алгоритм при этом будет таким:

- из Барнаула, Новокузнецка, Томска и Новосибирска загруженные тягачи с прицепами проследуют своим ходом до станции М;
- на станции М тягачи своим ходом заедут на платформу. При этом необходимо организовать специальную рампу и аппарели, пример представлен на рисунке 2;
- тягачи с полуприцепами закрепят в соответствии с правилами и Техническими условиями;
- сформированные на железнодорожной платформе тягачи к моменту отправки поезда «Грузового экспресса» будут поданы и прицеплены к нему.

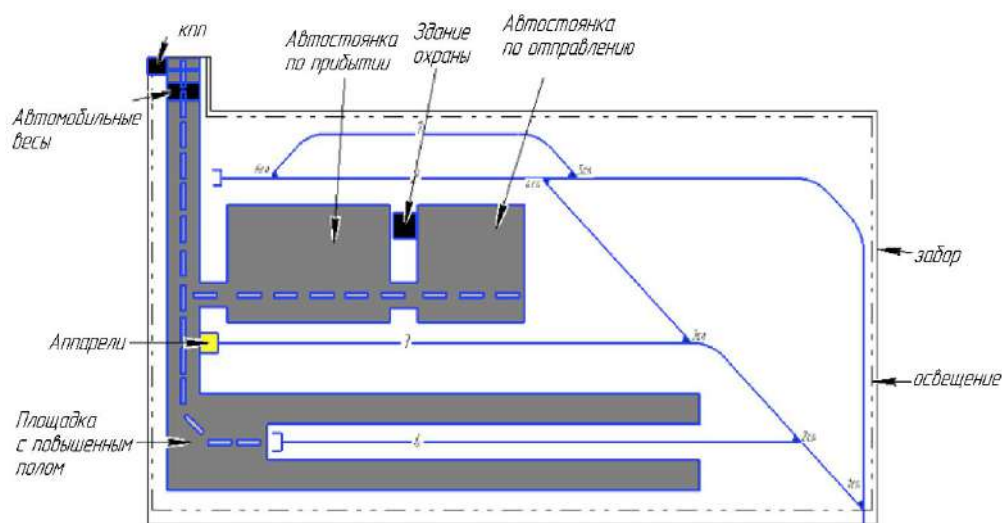


Рисунок 2 – План размещения аппарели и погрузочно-выгрузочной рампы

Такая схема организации движения контейнеров позволит быстрее накапливать и формировать поезд «Грузового экспресса», а также не будет снижать пропускную способность станции И в период накопления и формирования. Кроме того, специализированная рампа позволит избежать вертикальной погрузки с помощью подъемно-транспортной техники и снизить стоимость ПРР.

При определении наилучшего маршрута транспортировки грузов применяют метод логистики путем анализа итоговой стоимости, т. е. учитываются все издержки в логистической цепи. Затраты могут быть перегруппированы, либо увеличены в одной области, если такие действия приведут к экономии средств в целом для всей системы [6].

Как было определено ранее, контейнерные перевозки особенно эффективны в условиях бездорожья и большой протяженности пути. В рамках данной статьи было рассмотрено одно из перспективных направлений – Новосибирск – Дальний Восток – по нескольким схемам:

- 1) унимодальная автомобильная перевозка;
- 2) смешанная железнодорожно-автомобильная перевозка;
- 3) контейнерная перевозка;
- 4) контейнерная перевозка.

В качестве пункта назначения на Дальнем Востоке выбрали г. Хабаровск. Выбор был осуществлен по нескольким причинам:

- имеются контейнерные маршруты;
- крупный транспортный узел на Дальнем Востоке;
- представляет особый стратегический интерес государства как связующее звено при международной торговле;
- существует проблема передвижения автотранспорта в межсезонье, так как годовое количество осадков всюду превышает испаряемость, поэтому везде в большей или меньшей степени избыток увлажнения [7].

Для получения достоверных результатов сравнительного анализа необходимо, чтобы расчеты проводились по одинаковым параметрам. В качестве исходных параметров выступают: род груза – тарно-штучный, не требующий особых условий перевозки (мебель, кроме металлической и плетеной); вес груза – 20 т; расстояние от Новосибирска до Хабаровска по железной дороге – 5195 км, по автомобильной – 5041 км; расстояние от склада до терминала прием равным 100 км в обоих пунктах. Схематично расстояния между пунктами показаны на рисунке 3.

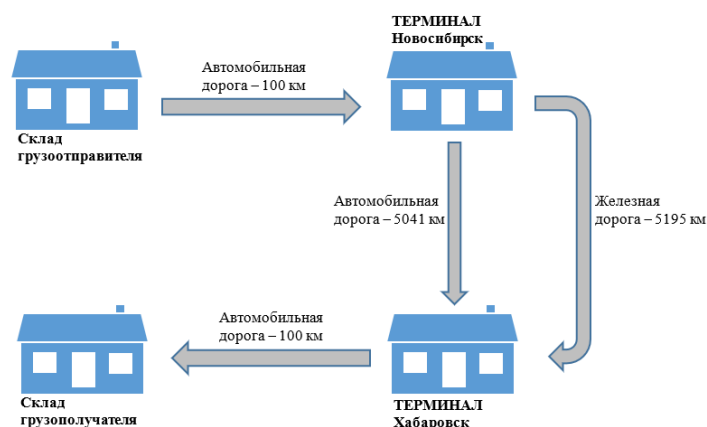


Рисунок 3 – Расстояния между участниками логистической цепи

Расчет времени прохождения маршрута автомобильным транспортом осуществляется с учетом режима труда и отдыха водителей, правил дорожного движения РФ и опыта российских перевозчиков.

Для определения времени движения по железной дороге были приняты во внимание следующие данные:

- эксплуатационные показатели РЖД за январь – апрель 2022 г.;
- скорость доставки грузов;
- средняя участковая скорость движения грузового поезда;
- средняя техническая скорость движения грузового поезда;
- маршрутная скорость грузового поезда.

Для определения стоимости доставки грузов автомобильным транспортом были рассчитаны варианты доставки различными транспортными компаниями, после чего получено среднее значение стоимости перевозки по заданному направлению (для тарно-штучных грузов с общей массой, равной 20 т) [8].

Контейнерные перевозки по праву признаны одними из наиболее эффективных. Использование одного транспортного модуля позволяет избежать дополнительных перегрузок. Способ определения стоимости перевозки аналогичен контрейлерному: автоплетчо от склада до терминала в каждую сторону плюс стоимость перевозки контейнера по железной дороге.

Для расчета полной стоимости контрейлерной доставки потребуется определить финансовую составляющую каждого из описанных этапов. Приняли, что загрузка в пункте отправления и выгрузка в пункте назначения будет выполнена силами ГО и ГП. Зная расстояние от терминалов до складов грузовладельцев и стоимость перевозки автотранспортом, определили путем произведения стоимость автоплетча в каждую сторону. Стоимость перевозки по железной дороге определялась посредством программы Rail-Tarif [9].

При этом общий срок контрейлерной доставки составит 13 дней, 10 из которых придется на перевозку по железной дороге, два – на операции, связанные с отправлением и прибытием, один – на автомобильную доставку.

Для наглядности полученные результаты отразили графически на рисунке 4.

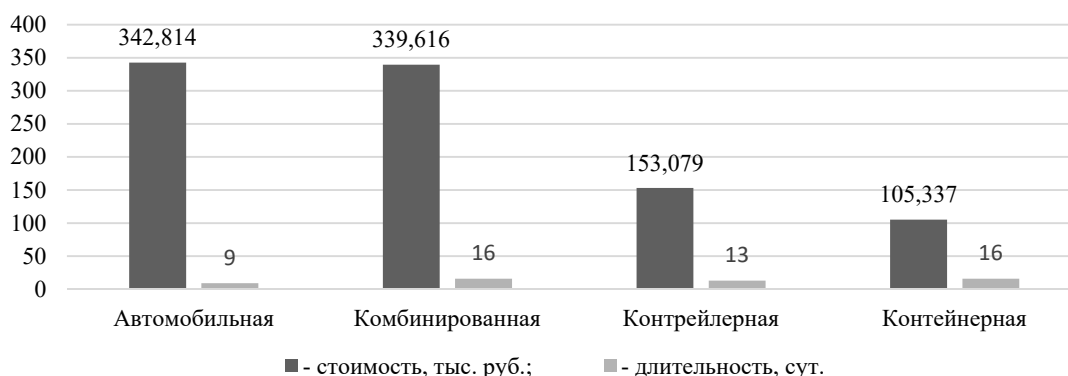


Рисунок 4 – Параметры перевозок по маршруту Новосибирск – Хабаровск

На основании полученных результатов можно заключить, что наиболее выгодным и одновременно простым вариантом транспортировки по маршруту Новосибирск – Благовещенск является контейнерная перевозка, однако она же является самой длительной – 16 суток, несмотря на то, что при внесении данных в программе Rail-Tarif был выбран прямой отправительский маршрут.

Лучшие показатели сроков доставки показала унимодальная автомобильная перевозка, однако в стоимостном выражении она превосходит контейнерную в три раза. Кроме того, данный вид перевозки является самым опасным с точки зрения потенциальных дорожно-транспортных происшествий.

Немного дешевле оказалась смешанная перевозка с перегрузкой с автомобильного транспорта на железнодорожный и снова на автомобильный. Однако с точки зрения логистического подхода данная система является неудачной: высокие сроки доставки, стоимость, необходимость перегрузки, следовательно, более высокий риск повреждения и хищения грузов.

В данной ситуации оптимальным вариантом выступает контрейлерная перевозка – она всего на четыре дня дольше автомобильной, но в 2,3 раза более выгодная.

Таким образом, контрейлерная перевозка является оптимальной по описанному направлению.

Помимо экономической эффективности контрейлерных перевозок по направлению Новосибирск – Дальний Восток данный способ перемещения грузов имеет значение в социальной и политической сферах. Транспортный комплекс Дальнего Востока играет значительную роль в обеспечении внешней торговли Российской Федерации.

В транспортной системе Дальнего Востока взаимодействуют все виды транспорта. Железнодорожный транспорт является основным видом магистрального транспорта, обеспечивающего межрайонные перевозки массовых грузов в регионе. На его долю приходится свыше 82 % грузооборота и около 40 % внутреннего пассажирооборота на этой территории. Около 2/3 грузооборота Дальневосточного региона приходится на импорт, экспорт и транзит, и основную массу грузов в международном сообщении перевозит морской транспорт. Связующим звеном в этой логистической системе выступает автомобильный транспорт, его роль заключается в принятии груза на железной дороге и доставке до морских портов [10].

При использовании контрейлерной технологии доставки вероятность порожнего пробега автотранспортных средств значительно снижается, так как существует большое количество импортных и транзитных грузов, следующих с востока на запад. Стоит отметить, что значительная доля полуфабрикатов и консервов из морепродуктов отправляется с Дальнего Востока во внутригосударственном сообщении. При следовании контрейлера до железнодорожной станции X-2 открывается выход на порты Де-Кастри, Ванино и Советская Гавань. Схематично маршруты показаны на рисунках 5 и 6.



Рисунок 5 – Автомобильные дороги от железнодорожной станции X-2 до портов Хабаровского края

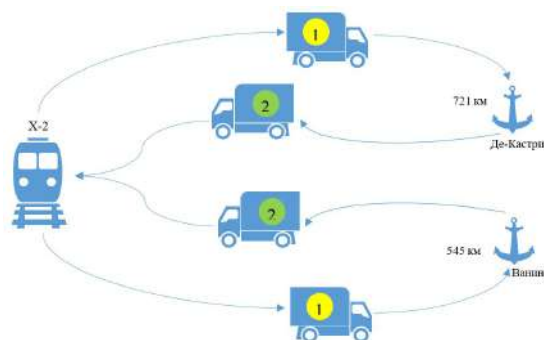


Рисунок 6 – Замкнутые маршруты

Из Новосибирска в Хабаровск ходят контейнерные поезда, а также до железнодорожной станции X-2 реализована услуга «Грузовой экспресс». Следовательно, для ускорения сроков доставки есть возможность отправлять контрейлеры контейнерным поездом или в составе «Грузового экспресса».

Однако даже при условии наличия специализированного подвижного состава, разработке соответствующей документации, приведения в соответствие инфраструктуры и внедрении контрейлерного движения на постоянной основе существует риск низкого спроса на услугу. Данный факт обусловлен в первую очередь тем, что автотранспорт перестал быть системной организацией и стал средой частных извозчиков. Уважаемый и очень известный ученый в области транспорта Л. Н. Матюшин комментирует: «Система не развивается, не потому что нет платформы, а потому что автомобильный транспорт – это не есть системная компания, с которой ФГК или РЖД могут договориться. Договариваться нужно с каждым конкретным

перевозчиком. А это невозможно. Сколько платформ ты ни создай, все равно к тебе частник не пойдет, потому что он должен будет делиться с тобой своим доходом» [11].

Безусловно, на первых этапах реализации проекта у мелких автоперевозчиков и владельцев грузовых автотранспортных средств будет недоверие к услуге. Особенно это касается несопровождаемых контрейлерных перевозок, когда автовладелец будет вынужден отправить свое транспортное средство на большое расстояние и поручить управление им незнакомому человеку. Чтобы преодолеть данный барьер, необходимо разработать нормативно-правовую базу, в которой будут определены все обязанности, права, ответственность сторон и указано, в какие моменты данная ответственность наступает.

Первыми пользователями данной услуги преимущественно будут крупные компании, имеющие в собственности автотранспортные средства. Это связано с экономией на транспортировке в целом по логистической цепи, а также с меньшим износом автомобильного подвижного состава и сокращением пробега.

Руководство железной дороги прогнозирует, что услуга контрейлерных перевозок в полной мере реализуется и набирает обороты, а станет особенно популярна примерно года через два, когда бизнес привыкнет к ней и будет закладывать эти маршруты в свою логистику, как комментирует генеральный директор АО «ФГК» Виктор Воронович.

После того, как данная технология закрепится на рынке, частные грузоперевозчики начнут постепенно входить в число пользователей контрейлерных перевозок, однако это будет актуально только при необходимости доставки грузов автотранспортом на большие расстояния и для сопровождаемых перевозок. Тогда перед водителями встанет вопрос: как выгоднее добираться до железнодорожной станции назначения – следовать вместе с автомобилем в пассажирском вагоне несколько суток или воспользоваться альтернативным, воздушным видом транспорта, и прилететь в день прибытия. С точки зрения расходов авиаперелет может оказаться менее выгодным вариантом, но по качеству отдыха водителя он превосходит вариант совместного следования по железной дороге.

Таким образом, после проведенного сравнительного анализа вариантов доставки водителей пришли к выводу о том, что при следовании водителя на поезде срок поездки составит четыре дня и три ночи, а прямой перелет – менее пяти часов, при этом цены на самолет относительно конкурентоспособны.

Наиболее дешевым вариантом будет заключить договор с водителями из Хабаровска, однако не каждый автовладелец доверит управление своим транспортным средством посторонним людям. Можно предположить, что несопровождаемые контрейлерные перевозки будут организовывать крупные транспортные компании, к тому же у большинства таких компаний имеются филиалы в различных регионах страны и есть собственный штат водительского персонала.

На основании проведенного анализа можно заключить, что в современных условиях стремительного развития торговых отношений растет спрос на транспортно-логистические услуги, а с учетом конкуренции транспортных компаний спрос этот ведет к повышению качества сервиса и в конечном итоге благоприятно повлияет на эффективность выполнения транспортных операций.

Учитывая востребованность автомобильного и железнодорожного транспорта в грузовом сообщении, наиболее актуальным представляется вопрос поиска форм их эффективного взаимодействия, в том числе и посредством контрейлерных перевозок, которые, как показал мировой опыт их применения, при определенных условиях могут быть вполне высокоэффективным инструментом решения транспортных задач.

Проведенное исследование перевозок тарно-штучных грузов различными видами транспорта позволило выявить сильные и слабые стороны, а также возможные проблемы и угрозы, связанные с организацией контрейлерных перевозок в России. Выяснили, что для успешной реализации контрейлерного движения в России требуется проведение комплекса мер, охватывающих технические, технологические, организационные и нормативно-правовые аспекты.

Список литературы

1. Федорина, А. В. Комплексный подход к внедрению контрейлерных перевозок в России / А. В. Федорина, А. В. Цыганов // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2015. – Т. 5. – № 1. – С. 21–28.
2. Мухамедова, З. Г. Обоснование факторов, влияющих на технологию контрейлерных перевозок / З. Г. Мухамедова, Д. Ш. Бобоев, Х. М. Якумбаев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 3 (51). – С. 136–144.
3. Грешенштейн, А. П. Обзор средств обеспечения приоритетных условий движения общественного транспорта на перекрестках / А. П. Грешенштейн, Е. В. Журина, Е. А. Петренина. – Текст : непосредственный // Политранспортные системы: материалы международной научно-технической конференции : в 3 частях, Новосибирск, 21–22 сентября 2022 г. / Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2022. – Ч. 3. – С. 217–223.
4. Гришкова, Д. Ю. Контрейлерные перевозки: направления, недостатки и перспективы развития / Д. Ю. Гришкова, Н. А. Тельнов. – Текст : непосредственный // Вызовы глобализации и развитие цифрового общества в условиях новой реальности : сборник материалов международной научно-практической конференции, Москва, 17 марта 2023 г. – Москва : АЛЕФ, 2023. – С. 53–58.
5. Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С. Э. Ольховиков, Е. А. Петренина, И. Н. Кагадий, О. Б. Шерстобитова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 106–118.
6. Эргашева, З. В. Совершенствование технологии обработки контейнеров в составе блок-трейна по отправлению на станции примыкания железнодорожного терминала / З. В. Эргашева, Ж. С. Баротов, Ф. К. Самиев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55). – С. 73–83.
7. Псеровская, Е. Д. Оценка эффективности распределительного центра при разных вариантах консолидации грузопотоков / Е. Д. Псеровская, А. П. Грешенштейн. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2021. – № 3 (70). – С. 22–27.
8. Никонов, В. А. Тенденции развития устройств крепления контейнеров / В. А. Никонов, В. С. Коссов, Г. И. Петров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 3 (47). – С. 41–50.
9. Гришкова, Д. Ю. Определение перерабатывающей способности контейнерного терминала / Д. Ю. Гришкова. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (64). – С. 44–51.
10. Псеровская, Е. Д. Услуга «грузовой экспресс» как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / Е. Д. Псеровская, А. С. Ким. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (53). – С. 37–45.
11. Гладунов, В. А. Выбор оптимальных логистических схем поставок товаров из Китая в Российскую Федерацию при использовании контейнеров / В. А. Гладунов, Е. М. Бондаренко. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (64). – С. 15–23.

References

1. Fedorina A.V., Tsyganov A.V. An integrated approach to the implementation of piggyback transportation in Russia. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii – Modern problems of Russian transport complex*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 21-28 (In Russian).
2. Mukhamedova Z.G., Boboev D.Sh., Yakupbaev Kh.M. Substantiation of factors affecting the technology of contrailer transportation. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 3 (51), pp. 136-144 (In Russian).

3. Grefenshtein A.P., Zhurina E.V., Petreneva E.A. [Overview of public transport priority facilities at intersections]. *Politransportnye sistemy: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Polytransport systems : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, 2022, part 3, pp. 217-223 (In Russian).

4. Grishkova D.Yu., Telnov N.A. [Contraileer transportation: directions, disadvantages and prospects of development]. *Vyzovy globalizatsii i razvitie tsifrovogo obshchestva v usloviakh novoi real'nosti : sbornik materialov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The challenges of globalization and the development of a digital society in a new reality : A collection of materials from the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2023, pp. 53-58 (In Russian).

5. Olkhovikov S.E., Petreneva E.A., Kagadiy I.N., Sherstobitova O.B. Formation of junction multimodal transport and logistics centers. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya – Bulletin of the Rostov state university of railway engineering*, 2023, no. 1 (89), pp. 106-118 (In Russian).

6. Ergasheva Z.V., Barotov Ja.S., Samiyev F.K. Improving the container handling technology as part of the block train for departure at the junction station of the railway terminal. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 3 (55), pp. 73-83 (In Russian).

7. Pserovskaya E.D., Grefenshteyn A.P. The time factor in the situational management of road transport of live poultry. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2021, no. 3 (70), pp. 22-27 (In Russian).

8. Nikonov V.A., Kossov V. S., Petrov G.I. Trends in the development of container fixing devices. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2021, no. 3 (47), pp. 41-50 (In Russian).

9. Grishkova D.Yu. Determination of the processing capacity of a container terminal. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2023, no. 1 (64), pp. 44-51 (In Russian).

10. Pserovskaya E.D., Kim A.S. Application of hot shot service as a way to increase competitiveness of railway transport. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2020, no. 2 (53), pp. 37-45 (In Russian).

11. Gladunov V.A., Bondarenko E.M. The choice of optimal logistics schemes for the supply of goods from China to the Russian Federation using containers. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2023, no. 1 (64), pp. 15-23 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петрeнeвa Eлeнa Aлeкceeeвнa

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

Тел.: +7 (913) 947-78-32.

E-mail: petreneva.ea@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Petreneva Elena Alekseevna

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Lecturer of the department «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock», SSTU.

Phone: +7 (913) 947-78-32.

E-mail: petreneva.ea@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петрeнeвa, E. A. Контрeйлeрнeыe пeрeвoзкeы кaк мeтoд лoгистичeскoгo пoдxoдa / E. A. Пeтрeнeвa. – Тeкст : нeпoсрeдствeнный // Извeстия Трaнссибa. – 2024. – № 1 (57). – С. 105 – 115.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petreneva E.A. Piggyback transportation as a method of logistic approach. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 105-115 (In Russian).

А. В. Кацай¹, М. В. Шевлюгин²

¹ООО «Кинемак», г. Москва, Российская Федерация;

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ОПЛАЧИВАЕМЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ

Аннотация. В исследовании рассмотрены составляющие потерь энергии в системе энергоснабжения работы городского электротранспорта – на тяговых подстанциях и в контактно-кабельной сети. Поскольку указанные потери энергии влияют на финансовые затраты предприятия горэлектротранспорта при потреблении оплачиваемой электроэнергии из высоковольтной линии, то важной задачей по повышению энергоэффективности является замещение этой энергии на бесплатную энергию рекуперации. Выведены методики и формулы определения объемов потерь в контактно-кабельной сети и на тяговых подстанциях для стационарной и подвижной нагрузки с использованием имеющихся у предприятий электротранспорта средств учета на фидерных кабелях и на подвижном составе. Установлено, что доля потерь при передаче энергии на полезную сетевую нагрузку от высоковольтного источника всегда выше, чем при питании ее от рекуперирующих вагонов, на величину, обратно пропорциональную КПД тяговой подстанции в силу того, что она не участвует в обороте энергии рекуперации в городском электротранспорте. Полученные значения КПД применяются для анализа потерь энергии, формирования прогнозов энергопотребления, а также участвуют в обосновании формирования мероприятий для снижения финансовых затрат предприятия на оплату электроэнергии в системе электропитания транспортной работы. Повышение объемов повторно используемой энергии рекуперации для замены ею энергии из высоковольтных линий возможно только за счет вовлечения в полезную работу избыточной рекуперации, которая сейчас рассеивается на тормозных резисторах и вторично не используется. Поскольку потери энергии в контактной сети в пять – шесть раз ниже, чем в накопителях с любым типом накопительных элементов, то единственным способом рентабельного вовлечения избыточной рекуперации в полезную транспортную работу является сохранение имеющихся межпоездных перетоков рекуперации по контактной сети, а также дополнение этих перетоков перенаправленной избыточной рекуперацией посредством использования накопителей. Так как накопители бортового исполнения делают невозможными перетоки рекуперации по контактной сети, то их применение приводит к пятикратному росту потерь рекуперации. Работа стационарных накопителей сохраняет все имеющиеся межпоездные перетоки полезной рекуперации, а также добавляет новые каналы полезной утилизации избыточной рекуперации в ходе зарядки и выдает на нагрузку запасенную в накопительный элемент часть перенаправленной избыточной рекуперации.

Ключевые слова: потери энергии, рекуперативное торможение, полезная и избыточная рекуперация, накопители энергии, контактная сеть, тяговая подстанция, подвижной состав, стационарная нагрузка, перенаправление избыточной рекуперации.

Alexander V. Katsay¹, Maxim V. Shevlyugin²

¹Kinemak Llc, Moscow, the Russian Federation;

²Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE VOLUME OF PAID ELECTRICITY LOSSES IN THE CONTACT NETWORK OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT WITH RECOVERY

Abstract. The study examines the components of energy losses in the power supply system of urban electric transport – at traction substations and in the contact-cable network. Since these energy losses affect the financial costs of the city electric transport enterprise when consuming paid electricity from a high-voltage line, an important task to improve energy efficiency is to replace this energy with free energy recovery. Methods and formulas for determining the volume of losses in the contact-cable network and at traction substations for stationary and mobile loads are derived using the means of accounting available to electric transport enterprises on feeder cables and on rolling stock. It is established that the share of losses in the transmission of energy to the utility network load from a high-voltage source is always higher than when it is powered from recuperating wagons, by an amount inversely proportional to the efficiency of the traction substation due to the fact that it does not participate in the turnover of energy recovery in urban electric transport. The obtained

efficiency values are used to analyze energy losses, generate forecasts of energy consumption, and also participate in the justification of the formation of measures to reduce the financial costs of the enterprise to pay for electricity in the power supply system of transport work. Increasing the volume of reused recovery energy to replace it with energy from high-voltage lines is possible only by involving excess recovery in useful work, which is now dissipated on brake resistors and is not used again. Since energy losses in the contact network are 5 – 6 times lower than in storage devices with any type of storage elements, the only way to cost-effectively involve excess recovery in useful transport work is to preserve the existing inter-train recuperation flows through the contact network, as well as supplement these flows with redirected excess recovery through the use of storage devices. Because onboard storage devices make it impossible recuperation flows through the contact network, then their use leads to a fivefold increase in recovery losses. The operation of stationary storage devices preserves all available inter-train flows of useful recovery, and also adds new channels for the useful utilization of excess recovery during charging and, in addition, when a part of the redirected excess recovery stored in the storage element is issued to the load.

Keywords: *energy losses, regenerative braking, recuperative energy flows, useful and excessive recovery, stationary storage, contact network, traction substation, rolling stock, stationary load, redirection of excess recovery.*

Потери энергии в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) оказывают заметное влияние на общее энергопотребление предприятия горэлектротранспорта (ГЭТ) и, как следствие, на экономическую эффективность транспортной работы в целом. В современных электротранспортных системах на подвижном составе (трамваях и троллейбусах) широко используются частотные преобразователи, позволяющие сокращать потребление энергии за счет снижения пусковых токов тяговых электродвигателей, а также возвращать на полезную работу часть затраченной на тягу энергии при рекуперативном торможении. В ходе торможения подвижного состава (ПС) с выдачей рекуперативной энергии в контактно-кабельную сеть (ККС) последняя не имеет закупочной стоимости в отличие от потребления энергии от тяговых подстанций (ТП), для питания которых энергия поставляется энергоснабжающей организацией по коммерческим ценам. Соответственно бесплатный энергоисточник в виде рекуперированного ПС замещает и потери оплачиваемой энергии в ККС и на ТП. Объем потребленной оплачиваемой энергии фиксируется входным счетчиком на стороне высоковольтного трехфазного напряжения тяговой подстанции (АСКУЭ), обычно на линии 6(10) кВ, которая является первичным источником электропитания в ГЭТе. С точки зрения комплексной эффективности заданного объема транспортной работы вопрос оптимизации энергопотребления в СТЭ сводится к минимизации стоимостных затрат на тягу и нетяговые нужды при движении ПС на линии [1].

Рекуперированная подвижным составом энергия потребляется полезной нагрузкой на выпрямленной низковольтной стороне ТП и с целью производственного учета может быть зафиксирована счетчиками постоянного тока, размещенными на клеммах токосъемников вагонов. Рекуперированные тяговые электродвигатели подвижного состава являются вторичными источниками энергии в системе энергоснабжения транспортной работы, поскольку выдают на нагрузку несколько раз преобразованную энергию, ранее потребленную тяговыми устройствами из контактной сети, в том числе получаемую от первичного и вторичных источников энергии. Выданная в контактную сеть полезная часть рекуперации замещает часть энергии от ТП для работы нагрузки, включая пропорциональную долю транспортных потерь в ней. Для правильного определения объемов замещения первичной энергии на бесплатную рекуперативную необходимо привести измеренные или рассчитанные показатели полезно использованной рекуперированной энергии, полученные на выпрямленной низковольтной стороне СТЭ, к показателям энергопотребления на высоковольтной трехфазной стороне тяговой подстанции, т. е. к первичному энергоисточнику. Такое приведение объемов снижения потребления оплачиваемой энергии на выпрямленной стороне (за счет повторного использования рекуперативной) к потребляемой платной энергии по трехфазной высоковольтной стороне позволяет корректно оценить экономию как в энергетическом балансе, так и в стоимостном [2, 3]. Прямое сравнение энергопотребления и генерации тягового привода по выпрямленной стороне с входной энергией в точке присоединения систем АСКУЭ некорректно, так как при этом выпадают потери энергии при ее преобразованиях на ТП и передаче по ККС.

В последнее время в городском электротранспорте исследуется применение накопителей энергии (НЭ) бортового и стационарного размещения, предназначенных для содействия более полному использованию рекуперированной энергии, поскольку без накопителей нереализованной остается избыточная часть рекуперации, которая хотя и выполняет полезную для поезда работу по поглощению выделяемой в ходе торможения энергии, но при этом данная энергия вторично работу в транспортной системе не производит, а рассеивается теплом в атмосферу на тормозных резисторах. Все накопители запасают избыточную часть рекуперации (а накопители бортового размещения забирают еще и полезную рекуперацию), которую выделяют при рекуперативном торможении вторичные энергоисточники – тяговые приводы, преобразуют и хранят ее и выделяют на нагрузку, т. е. являются третичными источниками в энергосистеме ГЭТа. Перенаправляющие бывшую ранее избыточной энергией рекуперации на полезную нагрузку накопители так же, как и тяговые приводы в генераторном режиме, являются собственным источником электропитания предприятия ГЭТа, участвуют в выполнении транспортной работы и тем самым дополнительно ко вторичным энергоисточникам в СТЭ замещают часть оплачиваемой энергии, получаемой от первичного источника. Помимо перенаправления избыточной рекуперированной энергии на полезную нагрузку при работе накопителей последними также расходуется энергия на собственные нужды (система управления, климат-контроль, дополнительные тяговые энергозатраты на перевозку бортовых НЭ). Эта энергия расходуется как от первичного источника, так и от вторичных и от третичных, т. е. накопители частично самопитают свои собственные нужды запасаемой и выдаваемой энергией рекуперации.

Определение экономической эффективности работы СТЭ требует приведения энергобаланса на выпрямленной стороне ТП, для формирования которого имеются несколько измеренных параметров в различных точках учета ККС, к единой точке учета на высоковольтной трехфазной стороне, в которой установлен прибор учета АСКУЭ. Условием для такого приведения помимо измеренных данных в перечисленных выше точках учета по выпрямленной стороне является наличие синхронных показателей эффективности передачи энергии по ККС и преобразования ее на ТП. Задачей данного исследования является выведение экспериментального способа определения транспортных потерь энергии на ТП и в ККС ГЭТа, в том числе потерь энергии рекуперации, и влияния последних на потребление энергии системой от оплачиваемого первичного источника согласно методике, выведенной авторами в работе [4].

Потери энергии в системе тягового электроснабжения. Указанная методика [4] учитывает в энергобалансе СТЭ за период не только выдаваемую в ККС всеми источниками энергию, но и объем потребления полезной нагрузкой (подвижным составом $E_{ЭПС}$ и стационарной нагрузкой $E_{стан}$) на своих входных клеммах, а также объемы потерь энергии при ее преобразованиях на ТП и при транспортировке в ККС ($\Delta E_{ТП}$ и $\Delta E_{ККС}$ соответственно). Без учета потерь энергии в процессах ее преобразований на тяговой подстанции общее уравнение полного энергобаланса за исследуемый период на выпрямленной стороне ТП (т. е. в ККС) принимает вид:

$$E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}} = E_{\text{ЭПС}} + E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{ККС}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{рек. полезн}}$ – выдаваемая в ККС на полезную нагрузку рекуперативная энергия, $E_{\text{выпр. ТП}}$ – выдаваемая в ККС выпрямительным агрегатом ТП энергия; $\Delta E_{\text{ККС}}$ складывается из $\Delta E_{\text{стан}}$ – потерь энергии в ККС при питании стационарной нагрузки и $\Delta E_{\text{ЭПС}}$ – потерь энергии в ККС при питании подвижного состава.

На рисунке 1 представлено схематическое изображение системы одностороннего электропитания секций ККС ГЭТа от тяговой подстанции. На высоковольтной стороне тяговой подстанции установлена система энергоснабжающей организации по контролю и

учету электроэнергии (АСКУЭ), которая фиксирует объем поставляемой энергопоставщиком оплачиваемой энергии по высоковольтному трехфазному напряжению (6 – 10 кВ). В СТЭ проводится также производственный учет энергии по выпрямленному напряжению 600 В, поступающей после выпрямительного агрегата на сборную шину, от которой питаются фидерные кабели изолированных секций контактной сети.

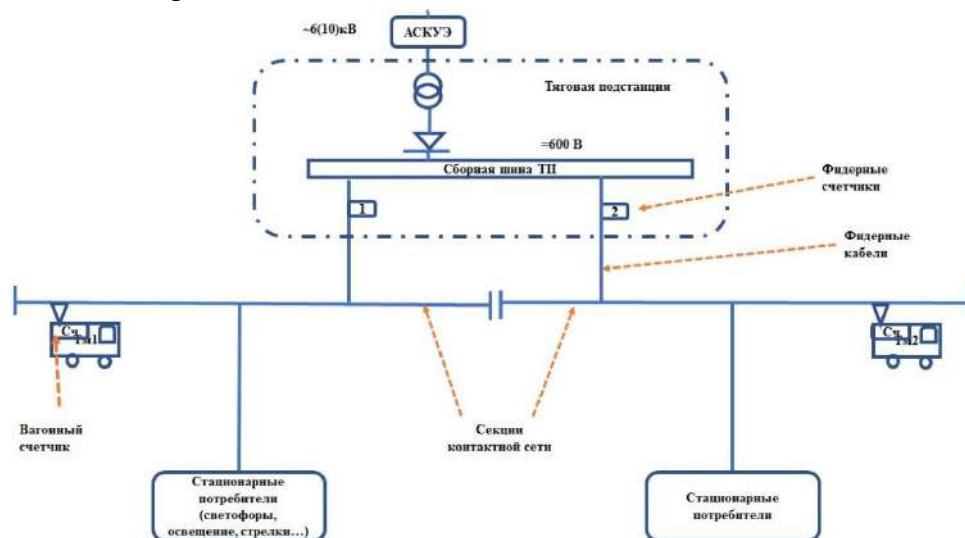


Рисунок 1 – Схема питания секций ККС от тяговой подстанции с точками измерения энергии

Обычно для учета выпрямленной энергии от ТП на каждый фидерный кабель устанавливается двунаправленный счетчик, который регистрирует как прямые токи питания своих кабелей ($E_{\text{прям. фид}}$), так и обратные рекуперативные токи по цепи межфидерного перетока рекуперации ($E_{\text{мф}}$). Внутрифидерные перетоки рекуперации ($E_{\text{вф}}$) такими счетчиками не учитываются, так как эти потоки внутри секций не доходят до фидерных счетчиков [5], хотя и учитываются в суммарном показателе объемов энергии полезной рекуперации бортовыми счетчиками поездов. Здесь и далее под поездами мы имеем в виду подвижной состав ГЭТа – троллейбусы, трамваи, метropоезда, монорельс, в том числе работающие по системе многих единиц.

В состав штатной сетевой стационарной нагрузки могут входить автоматизированные переводы стрелок, обогреватели стрелок, системы отслеживания и сигнализации, освещение остановочных павильонов и участков маршрутов, активные информационные табло, видеокамеры, системы связи и т. п. В некоторых системах ГЭТа количество шкафов питания такой нагрузки, присоединенных к контактной сети 600 В, может достигать нескольких десятков и даже сотен штук, а суммарное энергопотребление за период может быть значительным. Проблемой для полного инструментального замера элементов баланса в СТЭ является тот факт, что стационарная нагрузка, как правило, не оснащена приборами учета.

В силу этого инструментальный замер потерь в системе невозможен. В источнике [6] указано, что «...на уровне предприятия K , [коэффициент, учитывающий потери в системе электроснабжения – $\eta_{\text{ККС}}$] может определяться на основе экспериментальных данных», однако методика такого определения не приведена.

Бортовые счетчики, как правило, подключены к токоприемникам и являются двунаправленными, т. е. регистрируют как прямое потребление энергии из ККС ($E_{\text{ЭПС}}$), так и выдаваемую в ККС рекуперативную энергию на полезную нагрузку ($E_{\text{рек. полезн}}$) за вычетом части ее, потребленной бортовой нетяговой нагрузкой, находящейся в цепи между рекуперирующим тяговым электродвигателем и бортовым счетчиком.

Потери энергии при питании полезной нагрузки в СТЭ ГЭТа возникают

на тяговой подстанции в ходе преобразований в понизительных трансформаторах и в выпрямительных агрегатах – $\Delta E_{ТП}$;

в контактно-кабельной сети при передаче энергии от первичных, вторичных и третичных источников питания на полезную нагрузку – $\Delta E_{ККС}$;

в накопителях энергии в ходе преобразований энергии рекуперации поездов при зарядке и выдаче энергии, а также при хранении – $\Delta E_{НЭ}$.

За определенный период потери на тяговой подстанции $\Delta E_{ТП}$ фиксируются в виде разницы между поданной из высоковольтной линии на вход ТП $E_{АСКУЭ}$ и выданной на сборную шину энергией с выпрямительных агрегатов $E_{выпр. ТП}$:

$$\Delta E_{ТП} = E_{АСКУЭ} - E_{выпр. ТП} \quad (2)$$

Исходя из уравнения (1) суммарные потери по выпрямленной стороне в контактно-кабельной сети $\Delta E_{ККС}$ есть разница между поступившей от всех источников в систему выпрямленной энергией напряжением 600 В и энергией, потребленной приемниками:

$$\Delta E_{ККС} = E_{выпр. ТП} + E_{рек. полезн} - E_{ЭПС} - E_{стац} \quad (3)$$

В некоторых источниках (см. таблицу) по этой теме приводятся обобщенные показатели эффективности подсистем и всей системы тягового энергоснабжения ГЭТа [7, с. 11; 8, 9].

Коэффициенты эффективности элементов СТЭ (по данным источников [8 – 10])

Элемент СТЭ	КПД
Тяговая подстанция	0,95 [8] – 0,97
Кабели тяговой сети	0,95
Контактная сеть	0,85
Вся СТЭ	0,77 (0,85 – 0,93 [9, с. 47])

Для разных типов ГЭТа исследователи установили ориентировочные показатели потерь в ККС. Так, в сетях питания метрополитена «потери энергии в контактной сети достаточно велики, растут с увеличением длины поездов и ростом скоростей, достигая 5 % и более» [10]. В городском наземном электротранспорте исследователи приводят средний коэффициент полезного действия тяговой сети ($\eta_{ККС}$), равный 0,93 [8; 9, с. 47]; т. е. средние потери в сети составляют ~ 7 %. Причем в изношенных сетях потери в системах электроснабжения (интегрально – в ТП и в ККС) могут составлять до 20 % общих потерь электроэнергии при эксплуатации трамвая и троллейбуса. Отмечается также тот факт, что при номинальном напряжении на шинах тяговой подстанции 600 В напряжение на токоприемнике ЭПС может снижаться до значения 400 В, т. е. потери на передачу энергии в таких условиях могут превышать 30 % [11].

Большой разброс показателей эффективности отдельных СТЭ зависит от множества параметров, например, от степени износа оборудования ТП и кабельных и контактных сетей, длины плеча передачи энергии, объема потребления энергии на выполнение транспортной работы, погодных условий, характера рельефа участка движения, выполняемой транспортной работы, расписания движения ПС, напряжения в высоковольтной питающей линии, напряжения в ККС, объема пассажироперевозок и др. [2, 3, 11, 12].

В СТЭ ГЭТа, в которых отсутствуют накопители или имеются бортовые либо стационарные накопители, структуры электрических цепей существенно различаются, они имеют каждая свою долю потребления оплачиваемой энергии от ТП в общем объеме электропитания. В силу этих отличий потери в таких системах должны быть выведены, экспериментально подтверждены и учтены для определения наиболее эффективной схемы построения или улучшения системы электропитания с точки зрения снижения потребления

оплачиваемой энергии от первичного источника на выполнение единицы транспортной работы.

Инструментальное измерение КПД тяговой подстанции. Для определения полных оплачиваемых потерь энергии в СТЭ требуется определить долю потерь энергии на ТП за период (день – месяц – год). Качественные отличия оборудования и режимов эксплуатации тяговых подстанций в системах энергоснабжения ГЭТа в различных городах, а также внутри одной системы требуют непосредственного определения КПД каждой ТП и всей системы СТЭ в целом, поскольку допускаемый в теоретических источниках разброс показателей потерь достаточно широк и не учитывает сезонные зависимости и изменения расписаний, что делает весьма приближительными результаты расчетов отдельной системы питания с опорой на общие справочные данные.

Приведение объемов энергии рекуперации, циркулирующей в ККС, к показателю точки учета оплачиваемой энергии на трехфазной стороне (т. е. к месту установки АСКУЭ) для определения степени замещения ею оплачиваемой энергии от ТП заключается в учете потерь в ходе преобразований энергии в ТП, а также в кабелях и в контактных проводах и рельсах при передаче от источника до нагрузки. Последовательность этапов приведения объемов разных видов рекуперации к точке установки АСКУЭ: от входных клемм нагрузки к сборной шине ТП (учет потерь в ККС) и далее – к высоковольтному трехфазному входу ТП (учет потерь в ТП).

Для получения значения на высоковольтной стороне подстанции потерь оплачиваемой энергии $\Delta E_{\text{АСКУЭ}}$ необходимо полученный показатель потерь по постоянному току $\Delta E_{\text{ККС}}$ разделить на значение $\eta_{\text{ТП}}$ коэффициента полезного действия тяговой подстанции за заданный период:

$$\Delta E_{\text{АСКУЭ}} = \frac{\Delta E_{\text{ККС}}}{\eta_{\text{ТП}}} . \quad (4)$$

Для тяговой подстанции общее значение КПД за период будет задаваться выражением

$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{E_{\text{выпр. ТП}}}{E_{\text{АСКУЭ}}} . \quad (5)$$

При фиксации потребления энергии на высоковольтной стороне тяговой подстанции должны быть исключены сторонние потребители на участке цепи от системы АСКУЭ до выхода выпрямительного агрегата тяговой подстанции. Например, при наличии в трансформаторе обмотки питания собственных нужд ТП однофазными или трехфазными токами низкого напряжения 220 или 380 В эти выходы должны быть оснащены счетчиком переменного тока, а полученные показатели потребления собственных нужд должны быть вычтены из расхода ТП при определении ее КПД на выполнение транспортной работы по выпрямленной стороне.

Практически нигде в ГЭТе не было опыта установки счетчиков постоянного тока на участках цепи между выпрямительным агрегатом и сборной шиной. Однако в последнее время в ряде наиболее передовых предприятий для детализации производственного учета расхода энергии стали внедряться счетчики постоянного тока на вводе каждого фидера на сборную шину тяговой подстанции (см. рисунок 1). Причем устанавливаются обычно двунаправленные счетчики, поскольку современный подвижной состав с частотным приводом тяговых двигателей позволяет выдавать в ККС часть энергии рекуперации на ее повторное полезное использование сетевой нагрузкой. Определенная доля этой полезной рекуперации потребляется нагрузкой на том же фидере, на котором происходит рекуперативное торможение вагона, а другая в силу недостаточной мощности такой нагрузки на рекуперирующем фидере перетекает через сборную шину на другие фидеры, на которых достаточная нагрузка для потребления мощности рекуперации сформирована. То есть через

сборную шину протекают токи как от тяговой подстанции $E_{\text{выпр. ТП}}$, так и между фидерами от рекупирующих вагонов на нагрузку (они фиксируются как обратная энергия по фидерным счетчикам – межфидерные перетоки рекуперации $E_{\text{мф}}$). Чтобы выделить из общего значения прямой энергии счетчика, проходящей от сборной шины на фидеры питания $E_{\text{фид. прям}}$, объем полученной от ТП $E_{\text{выпр-ТП}}$, необходимо вычесть из этого совокупного значения за период прямой энергии счетчика значение обратной энергии фидеров $E_{\text{мф}}$:

$$E_{\text{выпр. ТП}} = \sum E_{\text{фид. прям}} - \sum E_{\text{мф}}. \quad (6)$$

С учетом специфики измерений в ГЭТе согласно выражению (6) формула (5) приобретает вид:

$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{\sum E_{\text{фид. прям}} - \sum E_{\text{мф}}}{E_{\text{АСКУЭ}}}. \quad (7)$$

Предложенный способ инструментального замера КПД тяговой подстанции ГЭТа позволяет проводить его на постоянной основе, используя показатели уже имеющихся измерительных приборов на фидерах и счетчика АСКУЭ.

Детализация счетов от энергоснабжающей организации по АСКУЭ включает в себя показатели почасового энергопотребления ТП. В целях повышения точности оценки КПД работы СТЭ и для улучшения качества прогнозов энергопотребления будущих периодов функционально получение показателей стационарных и бортовых счетчиков постоянного тока может сниматься с такой же периодичностью (почасовой). В отраслевых нормативах средние значения потерь в ТП принимаются равными 0,05 [8].

В ходе исследования энергопотоков в ККС трамвая измерялись указанные в формуле (7) данные. На основе полученных значений определялся интегральный КПД этой подстанции за сутки, месяц, год. Среднее помесечное значение показателя в течение 2021 г. колебалось в диапазоне 84,6 – 90,7 процентов (рисунок 2).

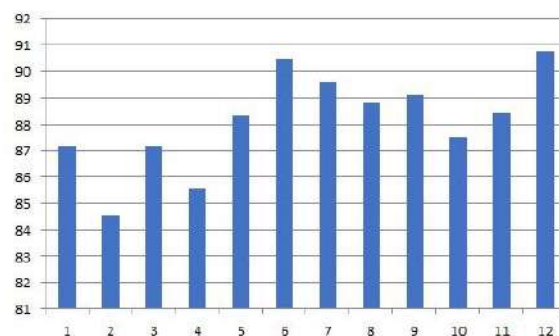


Рисунок 2 – Значение КПД исследуемой тяговой подстанции по месяцам 2021 г., %

Экспериментальное измерение потерь оплачиваемой энергии в контактно-кабельной сети. В системах, где перевозки производит ПС с реостатно-контакторной системой управления тягой (РКСУ), выдача рекуперации в ККС невозможна и вся электроэнергия для сетевой нагрузки поступает от тяговой подстанции. Соответственно здесь все потери энергии на активном сопротивлении ККС при ее передаче от ТП к нагрузке приходятся на оплачиваемую энергию, потребляемую от высоковольтной линии.

В системах ГЭТа, где имеется ПС с системами транзисторно-инверторного управления тяговыми электродвигателями (ТрСУ), помимо энергии от ТП в ККС поступает часть энергии рекуперативного торможения поездов. Полезная рекуперативная энергия является собственным вторичным ресурсом предприятия и не закупается у энергопоставщика, так как однажды она уже была ему оплачена, будучи полученной из высоковольтной линии. Полезная рекуперация питает сетевую нагрузку и, соответственно, замещает в общем энергобалансе системы часть энергии, которая без ТрСУ поступала бы от платного источника (рисунок 3).

В среднем за 2021 г. в исследованной трамвайной системе от вторичных энергоисточников поступило 17,3 % от выданной в ККС энергии, а от тяговых подстанций – 82,7 %.

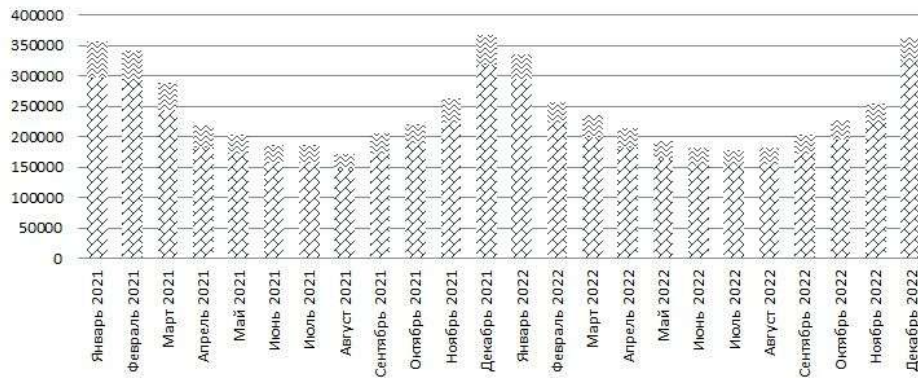


Рисунок 3 – Суммарный объем электроснабжения нагрузки на участках питания исследуемой ТП по выпрямленной стороне по месяцам 2021 – 2022 гг. от двух источников: оплачиваемого (тяговая подстанция – $E_{\text{выпр. ТП}}$, нижние столбцы) и бесплатного (полезная рекуперация вагонов – $E_{\text{рек. полезн.}}$, верхние столбцы), кВт · ч

Поскольку полезная рекуперация транспортируется по ККС, то часть ее теряется на активном сопротивлении кабелей и проводов. То есть появление в СТЭ энергии рекуперации с нулевой закупочной стоимостью снижает потребление оплачиваемой энергии в общем объеме энергопотребления от ТП, включая транспортные потери ее $\Delta E_{\text{ККС. ТП}}$, и увеличивает потребление вторичной неоплачиваемой энергии и, как следствие, сетевые потери этой последней $\Delta E_{\text{ККС. рек}}$ (рисунок 4). При этом расчет доли потерь неоплачиваемой энергии рекуперации может производиться на основе одинаковых параметров этой ККС, определяющих потери оплачиваемой части энергопотребления от ТП (длина плеча передачи энергии и величина удельного сопротивления проводов и кабелей).

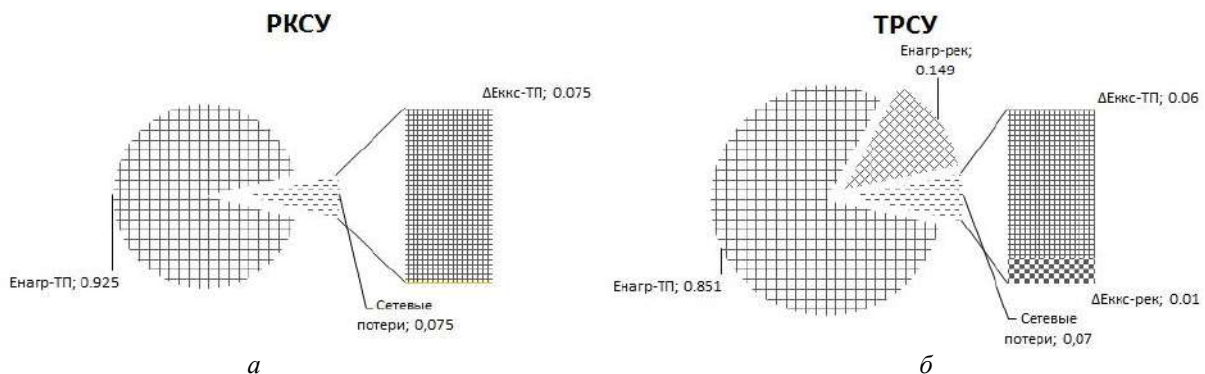


Рисунок 4 – Структуры расхода энергии, выделяемой в ККС источниками (ТП и рекуперирующими поездами) и потребляемой на клеммах нагрузки, и доли сетевых потерь энергии в ККС от этих источников с РКСУ (а) и с ТрСУ (б): $\Delta E_{\text{ККС. ТП}}$ – потери в ККС оплачиваемой энергии от первичного источника; $\Delta E_{\text{ККС. рек}}$ – потери в ККС бесплатной полезной энергии рекуперации при движении на линии поездов)

Тяговая подстанция ГЭТа не участвует в преобразованиях и передаче полезной рекуперативной энергии и, соответственно, не вносит своей добавки в ее потери, т. е. при полезной рекуперации в ККС нет составляющей потери энергии при преобразованиях в ТП. В силу этого объем энергии при питании одной и той же нагрузки за единичный период времени только от первичного источника ($E_{\text{нагр. ТП}}$), включая все потери ее (в ККС и на ТП), всегда больше, чем объем энергии для питания этой же нагрузки ($E_{\text{нагр. рек}}$) за одинаковое время только от вторичного источника (рекуперирующего поезда), включая все ее потери:

$$\frac{E_{\text{нагр. ТП}}}{\eta_{\text{ТП}} \cdot \eta_{\text{ККС}}} > \frac{E_{\text{нагр. рек}}}{\eta_{\text{ККС}}} \quad (8)$$

В основу экспериментального способа определения потерь в ККС положено уравнение баланса (1). Условием его реализации является оснащённость двунаправленными по постоянному току счетчиками энергии всех фидеров тяговых подстанций и всех единиц подвижного состава. Измерения производятся при нормальной перевозочной работе в обычный рабочий день (например, по расписанию буднего дня), лучше – ежедневно, данные счетчиков фиксируются по итогам суток.

Общее уравнение энергобаланса всей системы за время измерений (1) с детализацией потерь в ККС (например, за день или месяц) имеет вид

$$E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}} = E_{\text{ЭПС}} + \Delta E_{\text{ЭПС}} + (E_{\text{стан}} + \Delta E_{\text{стан}}). \quad (9)$$

Исходя из этого за период измерений КПД контактно-кабельной сети описывается в общем виде уравнением:

$$\eta_{\text{ККС}} = \frac{E_{\text{ЭПС}} + E_{\text{стан}}}{E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}}. \quad (10)$$

Наиболее простой вариант для экспериментального определения потерь энергии в ККС осуществляется для СТЭ, в которых стационарная сетевая нагрузка отсутствует, а весь подвижной состав состоит из поездов с РКСУ, в которых рекуперативная энергия отсутствует. В таких случаях в уравнении (9) значения $E_{\text{стан}}$, $\Delta E_{\text{стан}}$ и $E_{\text{рек. полезн}}$ – нулевые.

Если на маршрутах ходят все вагоны с ТрСУ, т. е. где имеется рекуперативная энергия, а стационарная нагрузка также отсутствует, то $\eta_{\text{ККС}}$ будет основываться также на фактически измеренных данных по указанным счетчикам и в уравнении (9) нулевое значение будет у показателей $E_{\text{стан}}$ и $\Delta E_{\text{стан}}$.

В некоторых наиболее современных системах ГЭТа широко используется стационарное оборудование, участвующее в обслуживании перевозочного процесса: автоматизированные переводы стрелок, обогреватели стрелок, системы отслеживания и сигнализации, освещение остановочных пунктов и участков маршрутов, активные информационные табло, видеокамеры, системы связи и т. п. При наличии в ККС питаемого стационарного оборудования проводится определение средних значений потребления энергии этих устройств в СТЭ за период. Например, без движения ЭПС производится измерение фидерными счетчиками потребления энергии штатным стационарным оборудованием ККС на участках данной ТП. Баланс энергии в таких условиях отсутствия на линии ЭПС исходя из уравнения (9) описывается формулой

$$E_{\text{выпр. ТП. изм}} = E_{\text{стан. изм}} + \Delta E_{\text{стан. изм}}, \quad (11)$$

где $E_{\text{стан. изм}}$ – расход энергии на клеммах стационарного потребляющего оборудования, а $\Delta E_{\text{стан. изм}}$ – потери при передаче энергии по ККС только на питание стационарной нагрузки.

На этом этапе выделить $\Delta E_{\text{стан}}$ из $E_{\text{выпр. ТП}}$ пока невозможно, так как инструментально измеряется только $E_{\text{выпр. ТП}}$, а стационарная нагрузка не оснащена счетчиками. Полученное за указанный период значение $E_{\text{выпр. ТП. изм}}$ потребления стационарной нагрузкой и потерь при этом в ККС экстраполируется для этих показателей на весь рассматриваемый период работы СТЭ. В период работы подвижного состава на линии значение мощности потребления энергии на вводных клеммах стационарного оборудования не изменяется (или мощность потребления этого оборудования изменяется незначительно в сравнении с ночным потреблением), а такое оборудование обычно работает все время. Как правило, на участках питания одной ТП может работать стационарное оборудование, номинальная мощность энергопотребления которого не превышает нескольких киловатт, коэффициент загрузки меньше единицы, а суточный объем энергопотребления не превышает 10 – 50 кВт·ч. Доля этого объема составляет меньше

полупроцента от выдаваемой выпрямительным агрегатом ТП энергии, а относительного полного объема энергии источников ($E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}$) еще меньше, т. е. находится на уровне погрешности измерений. От этого объема энергопотребления потери энергии при транспортировке по ККС на питание стационарной нагрузки как минимум на порядок меньше, чем само ее энергопотребление. В силу этого с учетом малости потерь энергии при транспортировке на питание стационарной нагрузки для определения $\eta_{\text{ККС}}$ можно принимать во внимание только потери энергии на передачу для питания подвижного состава, как это фактически сделано в нормативных отраслевых рекомендациях [8]. С учетом этого формула (10) для определения $\eta_{\text{ККС}}$ принимает вид:

$$\eta_{\text{ККС}} = \frac{E_{\text{эпс}} + (E_{\text{стац}} + \Delta E_{\text{стац}})}{E_{\text{выпр. ТП}} + E_{\text{рек. полезн}}}, \quad (12)$$

где $(E_{\text{стац}} + \Delta E_{\text{стац}})$ – экстраполированное на рассматриваемый период измеренное значение энергопотребления стационарной нагрузки и потерь при передаче этой энергии в период без движения подвижного состава ($E_{\text{стац. изм}} + \Delta E_{\text{стац. изм}}$). При установлении абсолютного объема транспортных потерь энергии на питание штатной стационарной нагрузки используется полученное во время первого измерения без ЭПС по выражению (12) значение $\eta_{\text{ККС}}$:

$$\Delta E_{\text{ККС}} = E_{\text{выпр. ТП. изм}} \cdot (1 - \eta_{\text{ККС}}). \quad (13)$$

Рассчитанное по формуле (12) значение $\eta_{\text{ККС}}$ позволяет определять объем транспортных потерь при электропотреблении сети в периоды с близкими значениями температуры окружающей среды. Таким образом, инструментальное определение этого показателя с использованием современных приборов учета даст возможность точно прогнозировать объемы оплачиваемой энергии, в том числе ее потерь, в будущие периоды при различных параметрах работы транспортной системы и внешних погодных условиях.

Чтобы определить по трехфазной стороне абсолютное значение оплачиваемого объема потерь, необходимо привести полученное на выпрямленной стороне значение потерь энергии, выдаваемой от выпрямителя ТП, к значению на счетчике АСКУЭ согласно формуле (4), т. е. с учетом потерь этой энергии при ее преобразованиях на тяговой подстанции. Для этого необходимо полученное значение потерь энергии по выпрямленной стороне (13) (с учетом формулы (6)) разделить на КПД тяговой подстанции, определенный по уравнению (7):

$$\Delta E_{\text{АСКУЭ}} = \frac{\Delta E_{\text{ККС}}}{\eta_{\text{ТП}}} = \frac{(E_{\text{фид. прям}} - E_{\text{мф}}) \cdot (1 - \eta_{\text{ККС}})}{\eta_{\text{ТП}}}. \quad (14)$$

Практическое использование показателей потерь энергии на ТП и в ККС. Основанный на измеренных данных показатель потерь при передаче энергии по ККС на питание полезной сетевой нагрузки (стационарной и подвижной) позволяет найти объем дошедшей до нагрузки энергии от направленной в сеть всеми ее источниками и определить отклонение доли потерь от нормативно заданного показателя. Как уже было сказано, среднее нормативное значение КПД контактно-кабельной сети в большинстве отечественных исследовательских работ и отраслевых нормативных документов для ГЭТа рекомендуется принимать в размере 0,93, т. е. при использовании нормативного значения потерь в контактной сети потери энергии $\Delta E_{\text{ККС}}$ составляют за длительный период порядка 7 % от переданной энергии. Это значение было установлено в документе от 2013 г. [6] для сети, когда практически весь подвижной состав ГЭТа был с РКСУ, т. е. не имел возможности выдачи в ККС энергии рекуперации на повторное использование сетевой нагрузкой. С тех пор появление подвижного состава с ТрСУ и массовая замена им подвижного состава с РКСУ

привели как к перераспределению потоков и объемов циркулирующей энергии в ККС, так и к изменению объема и доли потерь оплачиваемой энергии. При замене ЭПС с РКСУ на поезда с ТрСУ не изменяется эффективная длина питания стационарной и подвижной нагрузки от первичного источника. Однако уменьшается объем энергопотребления от ТП в силу снижения главным образом тягового энергопотребления вагонов из-за работы тяговых частотных преобразователей, которые снижают в сети пиковые токи от ТП благодаря выдаче в сеть полезной рекуперации, а также замене тяговых двигателей постоянного тока на более эффективные асинхронные электромашины; изменяется и нетяговое потребление ЭПС. При этом абсолютное значение потерь оплачиваемой энергии в общем энергопотреблении сети снижается на долю уменьшения потребления энергии от ТП. То есть при сохранении электрических параметров ККС – сопротивления и длины кабелей и контактных проводов, а также суммарного энергопотребления всеми видами нагрузки – нормативный $\eta_{\text{ККС}}$ при передаче оплачиваемой энергии питания с ТП можно признать таким же, как и в случае движения по линии вагонов с РКСУ при одинаковых условиях. При этом абсолютное значение энергопотребления от ТП и доля этой энергии в общем потреблении сети уменьшаются за счет повторного использования бесплатной полезной энергии рекуперации.

Следовательно, для увеличения энергоэффективности транспортной работы необходимо принимать меры по увеличению объемов полезных перетоков энергии рекуперации по ККС, что после полного переоснащения подвижного состава на системы тяги с ТрСУ возможно, например, путем внедрения стационарных управляемых накопителей энергии.

При проведении модернизации действующей или проектировании новой контактной сети значение $\eta_{\text{ККС}}$ на основе постоянно измеряемых данных позволяет сформировать численные критерии для выбора планируемого к применению типа контактного провода и фидерного кабеля для обеспечения экономически приемлемого сечения с целью снижения непроизводительных потерь в проводе. На этот выбор главное влияние оказывают: объем экономии оплачиваемой энергии за срок T службы контактного провода и стоимость его закупки:

$$\Delta C = \Sigma C_{\text{э}} - K_{\text{ф. к. п}}, \quad (15)$$

где ΔC – экономический эффект по снижению транспортных потерь энергии от применения выбранных фидерных кабелей и контактного провода; $C_{\text{э}}$ – стоимость экономии на потерях оплачиваемой энергии в год; $K_{\text{ф. к. п}}$ – стоимость закупки и внедрения фидерного кабеля и контактного провода.

Наличие измеренных значений показателей КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети позволяет выстраивать подкрепленный расчетами баланс энергии в СТЭ на основе фактических данных набор технических требований к подвижному составу, планируемому к приобретению предприятием, для обеспечения минимизации потребления энергии на тягу и нетяговые нужды с целью снижения транспортных потерь токов в ККС и при преобразованиях в ТП. Такие требования относятся к минимизации веса тары вагона при сохранении или увеличении пассажироместности, умеренному энергопотреблению на обогрев и кондиционирование воздуха салона для поддержания нормальной температуры, обеспечению малого энергопотребления на внешнее и внутреннее освещение за счет применения энергоэффективных ламп при улучшении уровня освещенности, снижению удельного энергопотребления на тягу на 1 тоннокилометр транспортной работы и т. д.

Помимо этого показатели КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети применяются для расчета прогнозов экономии оплачиваемой энергии от ТП при использовании различных типов накопителей как стационарного, так и бортового исполнения [4]. Эффект экономии накопителями достигается благодаря перенаправлению на выполнение полезной транспортной работы избыточной энергии рекуперации, которая имеется у ЭПС с ТрСУ в СТЭ

без накопителей. Здесь следует отметить, что действительный КПД управляемых накопителей энергии для ГЭТа, в которых используются накопительные элементы любого применимого для электротранспорта типа (суперконденсаторные или маховиковые), не превышает в настоящее время значения 0,64 [13, 14], тогда как установленный нормативно показатель КПД контактно-кабельной сети равен 0,93 [6]. То есть потери в накопителях на единицу принятой энергии рекуперации минимум в пять раз превышают ее потери в тяговых сетях.

С учетом низкого КПД буферных накопителей с накопительными элементами любого типа для максимизации эффекта вовлечения на полезную работу неоплачиваемой энергии избыточной рекуперации наиболее предпочтительно применение таких типов накопителей энергии, которые полностью сохраняют межпоездные полезные перетоки рекуперации по контактной сети, существующие в этих системах при отсутствии накопителей. Поскольку без накопителя полезно задействовать всю избыточную рекуперацию не удастся, то единственной возможностью этого при сохранении сетевых перетоков рекуперации является применение стационарных накопителей энергии. Полное задействование избыточной рекуперации с сохранением сетевых перетоков полезной рекуперации позволяет максимально снизить абсолютное значение потребления оплачиваемой энергии от ТП, следовательно, и потерь оплачиваемой энергии при передаче по ККС. То есть чтобы снизить потери бесплатной энергии рекуперации в процессах преобразования ее в накопителях, требуется минимизировать объемы энергии, поступающей в них, для чего нужно сохранить существующие перетоки полезной рекуперации по ККС и добавить действие эффекта питания полезной сетевой нагрузки в ходе зарядки стационарного накопителя («эффекта КБК» [15]). Такой возможностью в силу свойств структуры электрической схемы обладают только накопители стационарного размещения. При установке накопителей энергии на борту поезда возможность межпоездных перетоков рекуперации теряется, т. е. потери от всего объема рекуперации увеличиваются с 7 до 36 % [4].

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

При замене подвижного состава на поезда с ТрСУ доля расхода оплачиваемой энергии от первичного источника по выпрямленной стороне ТП снижается на 10 – 20 %.

КПД ТП показывает уровень потерь энергии при снижении трансформатором входного напряжения и его выпрямлении. В период экспериментальных исследований на действующей ТП в течение почти полутора лет ежемесячное значение ее КПД варьировалось в диапазоне 0,846 – 0,907.

Эффективность ККС определяет уровень транспортных потерь энергии при питании сетевой нагрузки от ТП и от рекуперующих вагонов. Бесплатная энергия рекуперации замещает оплачиваемую энергию от ТП. Транспортные потери бесплатной энергии рекуперации замещают в ККС потери оплачиваемой энергии от ТП.

Нормативно установленные потери оплачиваемой энергии по выпрямленной стороне системы тягового энергоснабжения ГЭТа при движении подвижного состава с РКСУ приняты в размере до 7 %, а на тяговой подстанции – 5 % [9].

Экспериментальное установление значений КПД тяговой подстанции и контактно-кабельной сети по предложенному способу при современном уровне оснащения СТЭ и ЭПС приборами учета энергии является простой задачей, методически и экономически доступной для практической реализации на любом предприятии ГЭТа страны.

Транспортные потери бесплатной энергии рекуперации при перетоках по ККС (нормативно – до 7 %) в пять – шесть раз меньше, чем потери энергии рекуперации при использовании бортовых накопителей (36 %), электрическая схема использования которых не допускает сетевых перетоков рекуперации, т. е. в бортовых накопителях имеют место максимальные потери энергии (как рекуперации, так и от первичного источника) среди всех типов источников энергоснабжения в ГЭТе.

Увеличение перетоков рекуперации по ККС не только снижает абсолютное потребление оплачиваемой энергии от ТП на выполнение полезной транспортной работы, но и уменьшает потери оплачиваемой энергии.

Мониторинг фактических показателей потерь энергии в ККС позволяет разрабатывать организационные и технические меры для снижения этих потерь, что делает возможным значительно уменьшить потребление оплачиваемой электроэнергии от тяговых подстанций.

При преобладании внутрифидерных перетоков рекуперации на участках ТП транспортные потери в ККС рекуперативной энергии ниже, чем при питании этой же нагрузки от ТП, а при преобладании межфидерных перетоков – наоборот. При этом закупочная цена энергии рекуперации нулевая.

Абсолютное значение отпускаемого источником объема энергии при питании одной и той же нагрузки за единичный период времени от первичного источника (ТП), включая все потери ее (в ККС и на ТП), всегда больше, чем объем энергии от вторичного источника (рекуперированного поезда), включая все ее потери, за счет того, что в передаче рекуперативной энергии на нагрузку в ККС тяговая подстанция не участвует, следовательно, отсутствуют потери, присущие работе ТП.

Список литературы

1. Спиридонов, Е. А. Оценка влияния характеристик троллейбуса на эффективность рекуперативного торможения / Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев, Е. А. Хайленко. – Текст : непосредственный // Электропривод на транспорте и в промышленности : труды всерос. науч.-практ. конф. / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2018. – С. 235–243. – EDN YTZVBZ.

2. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2 (54). – С. 106–111. – EDN SJBUFB.

3. Черемисин, В.Т. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 114–120.

4. Кацай, А. В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 542–560.

5. Кацай, А. В. Структура потоков энергии рекуперации в контактной сети тяговой подстанции с наземным накопителем / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 48–79. – DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.03. – EDN ZHENIV.

6. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р. – Текст : непосредственный.

7. Загайнов, Н. А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса / Н. А. Загайнов, Б. С. Финкельштейн. – Москва : Транспорт, 1978. – 336 с. – Текст : непосредственный.

8. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. (в ред. распоряжения Минтранса России № НА-143-р от 25.12.2013). – Текст : непосредственный.

9. Хвостов, В. А. Тяговые расчеты на городском электротранспорте : учебное пособие / В. А. Хвостов, Р. В. Воскресенский. – Брянск : Брянский ин-т транспортного машиностроения, 1987. – 72 с. – Текст : непосредственный.

10. Лянда, А. А. Методы снижения расходов энергии на движение поездов метрополитена / А. А. Лянда, С. Ю. Козлов. – Текст : непосредственный // Проектирование, строительство и

эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения : сборник статей / под ред. М. О. Лебедева. – Москва : Перо, 2021. – С. 162–176. – EDN NMBUZI.

11. Ярославцев, М. В. Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ярославцев Михаил Викторович ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2016. – 22 с. – Текст: непосредственный. – EDN ZQGJVH.

12. Гречишников, В. А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене / В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 5 (49). – С. 54–58. – EDN RVRXND.

13. Кацай, А. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30. – № 4 (76). – С. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9. – EDN AMJPCB.

14. Чернигов, В. М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем / В. М. Чернигов // mapget.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL:http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (дата обращения: 14.03.2023).

15. Кацай, А. В. Эффект питания полезной сетевой нагрузки избыточной энергией рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя / А. В. Кацай, А. А. Бизяев, В. А. Козаревич. – Текст : непосредственный // Энергетические системы. – 2022. – № 4. – С. 80–86. – DOI 10.34031/ES.2022.4.008. – EDN MVMOSH.

References

1. Spiridonov E. A., Yaroslavtsev M. V., Khailenko E. A. [Assessment of the influence of trolleybus characteristics on the effectiveness of regenerative braking]. *Elektroprivod na transporte i v promyshlennosti : trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Electric drive in transport and industry : proceedings of the All-Russian scientific and practical Conference]. Khabarovsk, 2018, pp. 235-243, EDN YTZVBZ (In Russian).

2. Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Nezevak V.L. Evaluation of technological losses in traction network in conditions of regenerative braking by electric rolling stock. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov state university of railway engineering*, 2014, no. 2 (54), pp. 106-111, EDN SJBUFB (In Russian).

3. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vilgelm A.S. Main thesis of methodology for assessing useful energy recovery efficiency. *Vestnik rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya – Bulletin of the Rostov state university of railway engineering*, 2017, no. 1 (65), pp. 114-120 (In Russian).

4. Katsai A.V., Shevlyugin M.V. The influence of buffer storages of on-board and wayside types on the energy consumption of traction substations in electric transport. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2023, no. 4, pp. 542-560 (In Russian).

5. Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Structure of energy recovery flows in the contact network of a traction substation with a wayside storage. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia – Bulletin of Perm national research polytechnic university. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2023, no. 45, pp. 48-79. DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.03, EDN ZHENIV (In Russian).

6. Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport. Appendix to the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. April 18, 2013. No. NA-37-R (In Russian).

7. Zagainov N.A., Finkelstein B.S. *Tjagovye podstancii tramvaja i trollejbusa* [Traction substations of tram and trolleybus]. Moscow, Transport Publ., 1978, 336 p. (In Russian).

8. Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport. As amended by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. NA-143-r, 25.12.2013 (In Russian).

9. Khvostov V.A., Voskresensky R.V. *Tjagovye raschety na gorodskom elektrotransporte : uchebnoe posobie* [Traction calculations on urban electric transport : a textbook]. Bryansk, Bryansk Institute of Transport Engineering Publ., 1987, 72 p. (In Russian).

10. Landa A.A., Kozlov S.Yu Methods to reduce the energy consumption for traction of subway trains. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiia podzemnykh sooruzhenii transportnogo naznacheniiia : sbornik statei* [Design, construction and operation of underground structures for transport purposes : a collection of articles]. Moscow, Stylus Publ., 2021, pp. 162-176 (In Russian).

11. Yaroslavtsev M.V. *Energoeffektivnyi tiagovyi privod gorodskogo bezrel'sovogo transporta* (Energy-efficient traction drive of urban railless transport). Doctor's thesis abstract, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2016, 22 p. (In Russian).

12. Grechishnikov V.A., Shevlyugin M.V. Operation of power storage device in Moscow Metro. *Mir transporta – World of Transport and Transportation*, 2013, vol. 11, no 5 (49), pp. 54-58 (In Russian).

13. Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Efficiency coefficients of the energy storage device in the contact network of the city electric transport. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2022, vol. 30, no. 4 (76), pp. 127-141. DOI 10.14498/tech.2022.4.9. (In Russian).

14. Chernigov V.M. *Elektrooborudovanie tramvainogo vagona s emkostnym nakopitelem* [Chernigov V. M. Electrical equipment of a tram car with a capacitive accumulator]. Available at: URL:http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (accessed 14.03.2023).

15. Katsay A., Bizyaev A., Kozarevich V. The effect of powering the network payload with excess energy recovery during charging of a stationary storage device. *Energeticheskie sistemy – Energy system*, 2022, no. 4, pp. 80-86. DOI 10.34031/ES.2022.4.008., EDN MVMUCH (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кацай Александр Владимирович

ООО «Кинемак».

Южнопортовая ул., д. 40, стр. 3, г. Москва, 115088, Российская Федерация.

Кандидат философских наук, генеральный директор, ООО «Кинемак».

Тел.: +7 (916) 248-02-44.

E-mail: proton764@mail.ru

Шевлюгин Максим Валерьевич

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)).

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

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта», ПУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 274-02-74, доб. 37-63.

E-mail: mx_sh@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кацай, А. В. Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электротранспорта с рекуперацией / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 116 – 130.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Katsay Alexander Vladimirovich

LLC Kinemak.

40, b. 3, Yuzhnoportovaya st., 115088, Moscow.

Ph. D. in Philosophical Sciences, general director, LLC Kinemak.

Phone: +7 (916) 248-02-44.

E-mail: proton764@mail.ru

Shevlyugin Maxim Valeryevich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

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

Doctor of Sciences in Engineering, associate professor, head of the department «Electric Power Engineering of Transport», RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 274-02-74, ext. 37-63.

E-mail: mx_sh@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Experimental determination of the volume of paid electricity losses in the contact network of urban electric transport with recovery. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 116-130 (In Russian).

В. П. Закарюкин¹, А. В. Крюков^{2,3} Е. В. Воронина²

¹ ООО «Smart grid», г. Иркутск, Российская Федерация;

² Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация;

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
г. Иркутск, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ 25 кВ С УЧЕТОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОРТАЛЬНОГО ТИПА

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы электромагнитной безопасности в тяговых сетях (ТС) 25 кВ железных дорог переменного тока. Цель исследований состояла в разработке цифровых моделей для определения напряженностей электромагнитного поля (ЭМП), создаваемых ТС вблизи металлических конструкций порталного типа, в качестве которой рассматривался путепровод, расположенный над путями. Наличие проводящей конструкции существенно усложняет картину распределения ЭМП в пространстве. В отличие от плоскопараллельного ЭМП тяговой сети на перегонах в пролетах между опорами контактной сети поле в данной ситуации становится трехмерным. Технология определения напряженностей базируется на использовании концепции отрезков проводников ограниченной длины, часть из которых может располагаться под землей. Для возможности применения уравнений квазистационарной зоны на частотах до 2000 Гц размеры совокупности объектов, образованных этими проводниками, не должны превышать нескольких сотен метров. Моделируемая схема включала в себя эквивалентный генератор питающей электроэнергетической системы, тяговую подстанцию (ТП) с трансформатором мощностью 40 МВ·А, консольный участок тяговой сети 25 кВ двухпутной железной дороги протяженностью в 10 км с контактной подвеской, выполненной проводами ПБСМ-95+МФ-100. На расстоянии 2 км от подстанции предполагалось наличие путепровода шириной 3 м, основание которого расположено на высоте 9 м; также учитывались и перильные ограждения. По результатам моделирования получены зависимости амплитуд и составляющих напряженностей ЭМП от z-координаты, проходящей по оси дороги. Кроме того, построены объемные диаграммы, позволяющие анализировать распределение ЭМП в пространстве. Результаты проведенных исследований показали, что представленная методика позволяет осуществлять учет влияния металлических конструкций при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей. Данная методика может использоваться на практике при разработке мероприятий по улучшению условий электромагнитной безопасности.

Ключевые слова: тяговые сети 25 кВ, электромагнитные поля, учет проводящих конструкций, электромагнитная безопасность, моделирование.

Vasily P. Zakaryukin¹, Andrey V. Kryukov², Ekaterina V. Voronina²

¹ LLC «Smart grid», Irkutsk, the Russian Federation;

² Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation;

³ Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation

SIMULATING ELECTROMAGNETIC FIELDS OF A 25 kV TRACTION NETWORK NEAR PORTAL-TYPE METAL STRUCTURES

Abstract. The article discusses issues of electromagnetic safety in traction networks (TN) of 25 kV AC railways. The purpose of the research was to develop digital models to determine the electromagnetic field (EMF) strengths created by vehicles near portal-type metal structures, which was considered an overpass located above the tracks. The presence of a conductive structure significantly complicates the picture of EMF distribution in space. In contrast to the plane-parallel EMF of the traction network on the stages in the spans between the supports of the contact network, the field in this situation becomes three-dimensional. The technology for determining voltages is based on the use of the concept of sections of conductors of limited length, some of which may be located underground. To be able to apply the quasi-stationary zone equations at frequencies up to 2000 Hz, the size of the set of objects formed by these conductors should not exceed several hundred meters. The simulated circuit included an equivalent generator of the power supply system, a traction substation (TS) with a transformer with a capacity of 40 MVA, a cantilever section of a 25 kV traction network of a 10 km long double-track railway with a catenary suspension made of PBSM-95+MF-100 wires. At a distance of 2 km from the substation, it was assumed that there would be an overpass 3 m wide, the base of which was located at a height of 9 m; railings were also taken into account. Based on the modeling results, the dependences of the amplitudes and components of EMF strengths on the z-coordinate passing along the axis of the road were obtained. In addition, three-dimensional diagrams have been constructed that make it possible to analyze the distribution of EMF in space. The

results of the studies showed that the presented methodology makes it possible to take into account the influence of metal structures when modeling the electromagnetic fields of traction networks. This technique can be used in practice when developing measures to improve electromagnetic safety conditions. It can be used in practice when developing measures to improve electromagnetic safety conditions.

Keywords: traction networks 25 kV, electromagnetic floors, accounting of conductive structures, electromagnetic safety, modeling.

В современных условиях особое внимание уделяется вопросам электромагнитной безопасности (ЭМБ) объектов электроэнергетики [1, 2]. Одним из основных факторов, определяющих условия ЭМБ, являются электромагнитные поля, создаваемые в окрестностях этих объектов. Однофазные тяговые сети (ТС) 25 кВ могут генерировать ЭМП с повышенными уровнями напряженностей [3]. Для улучшения условий ЭМБ применяются специальные мероприятия, выбор которых в условиях масштабного внедрения цифровизации [4] должен осуществляться на основе компьютерного моделирования.

Актуальность задачи определения ЭМП ТС подтверждается большим числом работ по данной тематике, приведенных в библиографических списках монографий [1 – 3]. В последние годы появились публикации, посвященные дальнейшему развитию технологий определения ЭМП. Так, например, в статье [5] приведены результаты исследований ЭМП на участке железной дороги переменного тока. Электромагнитные поля в зонах, окружающих транспортное оборудование, рассмотрены в работе [6]. Решения задач моделирования и анализа ЭМП тяговой сети представлено в источнике [7]. Исследования ЭМП ТС в режимах короткого замыкания описаны в работе [8]. Результаты оценки величин электромагнитного воздействия ТС на смежные линии приведены в источнике [9].

Большинство из перечисленных работ посвящено решению задачи определения плоскопараллельных ЭМП, создаваемых тяговыми сетями в пролетах между опорами контактной сети (КС). Системный подход к моделированию таких полей предложен в монографии [3]. Он отличается универсальностью и применимостью для расчета напряженностей в тяговых сетях различного конструктивного исполнения, включая перспективные ТС повышенного напряжения.

Вблизи железной дороги могут располагаться проводящие сооружения, существенно искажающие распределение напряженностей в пространстве. К их числу относятся опоры КС, ограждения, трубо- и путепроводы, а также другие сооружения. При наличии таких конструкций поле становится трехмерным и задача его определения существенно усложняется. Развиваемая в настоящее время концепция киберфизических систем электроснабжения (КФСЭ), основанная на глубокой интеграции вычислительных ресурсов [10], предусматривает создание цифровых двойников, обеспечивающих моделирование КФСЭ с максимальным приближением к реальности за счет учета всех влияющих факторов. Поэтому компьютерные модели для анализа условий ЭМБ в КФСЭ должны корректно учитывать наличие указанных выше сооружений. Технология моделирования ЭМП, предложенная в книге [3], модифицирована для выполнения расчетов напряженностей трехмерных ЭМП. Она подробно описана в статье [11] и базируется на использовании моделей отрезков проводников ограниченной длины. Для возможности применения уравнений квазистационарной зоны на частотах до 2000 Гц размеры совокупности объектов, образованных этими проводниками, не должны превышать нескольких сотен метров.

Одним из часто встречающихся сооружений железной дороги являются путепроводы, представляющие собой конструкции порталного типа. Разработке методики определения напряженностей электромагнитного поля, создаваемых тяговой сетью вблизи таких конструкций, посвящена данная статья.

Методика моделирования. Компьютерная технология определения ЭМП [3, 12] предназначалась для расчета напряженностей плоскопараллельных полей объектов, размеры поперечных сечений которых значительно меньше их длины. Такой подход не позволял анализировать ЭМП токоведущих частей ограниченной протяженности, к которым относятся,

например, большинство элементов подстанций. Кроме того, в данной методике отсутствовала возможность учета краевых эффектов.

При наличии проводников ограниченной длины ЭМП становится трехмерным и задача моделирования существенно усложняется. Методика ее решения, предложенная в статье [11], базируется на следующих основных положениях:

токоведущие части представляются в виде прямолинейных отрезков, которые располагаются в пространстве в соответствии с конструкцией объекта; часть элементов, в частности, кабелей и деталей систем заземляющих устройств, могут находиться под землей; для использования уравнений квазистационарной зоны размеры совокупности объектов не должны превышать нескольких сотен метров.

анализируемая сеть может включать в свой состав линии электропередачи и тяговые сети, трансформаторы, нагрузки, наборы коротких проводников, которые для расчета режима моделируются так же, как провода ЛЭП; ввиду малости их сопротивлений такой подход не искажает режим сети; кроме того, могут использоваться заземленные проводники небольшой длины, с помощью которых возможно моделировать опоры ЛЭП и тяговой сети, порталы подстанций, молниеотводы и др.;

потенциалы и токи коротких проводов определяются путем расчета режима в фазных координатах [12, 13];

для определения электрического поля используется метод эквивалентных зарядов [14, 15]; для определения индукции магнитного поля применяются формулы Био-Савара;

плоскость XOZ декартовой системы координат соответствует поверхности земли, ось X перпендикулярна трассе дороги, а ось Y направлена вертикально вверх.

Описание модели. Моделируемая сеть включает в себя участок двухпутной железной дороги переменного тока 25 кВ со следующими элементами: эквивалентный генератор питающей электроэнергетической системы; тяговая подстанция с трансформатором мощностью 40 МВ·А; консольный участок тяговой сети 25 кВ протяженностью в 10 км с контактной подвеской, выполненной проводами ПБСМ-95+МФ-100. На расстоянии 2 км от подстанции предполагалось наличие путепровода шириной 3 м, основание которого расположено на высоте 9 м; учитывались также перильные ограждения. Схема расположения объектов показана на рисунке 1.

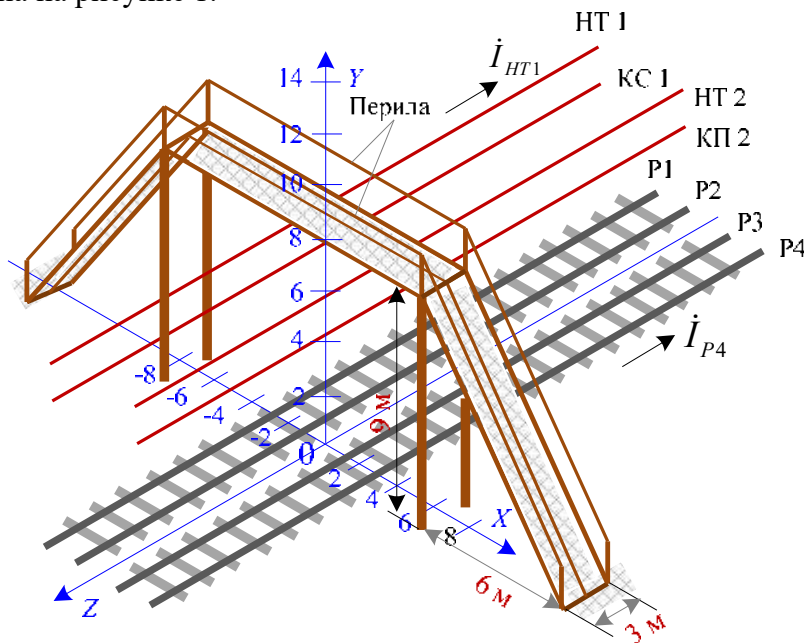


Рисунок 1 – Схема взаимного расположения железной дороги и путепровода

Для решения задач определения ЭМП вблизи путепровода использовался подход, описанный в статье [11] и реализованный в программном комплексе Fazonord, версия

5.3.2.9-2023. Фрагмент расчетной схемы системы тягового электроснабжения (СТЭ), с помощью которой проводился расчет трехмерных ЭМП вблизи путепровода, показан на рисунке 2. С целью реализации подхода, представленного в статье [11], кроме силовых элементов, описанных выше, сформированы модели путепровода и короткого участка тяговой сети при помощи набора коротких проводников. Длина короткого участка ТС взята равной 40 м. Проводимость земли задавалась на уровне 0,01 См/м. Детали путепровода представлены отрезками коротких проводов, расположение которых показано на рисунке 3, где по осям координат приняты разные масштабы. Токи, при которых производился расчет напряженностей магнитного поля: несущий трос – 182 А; контактный провод – 344 А; рельс 1 – 171 А; рельс 2 – 163 А.

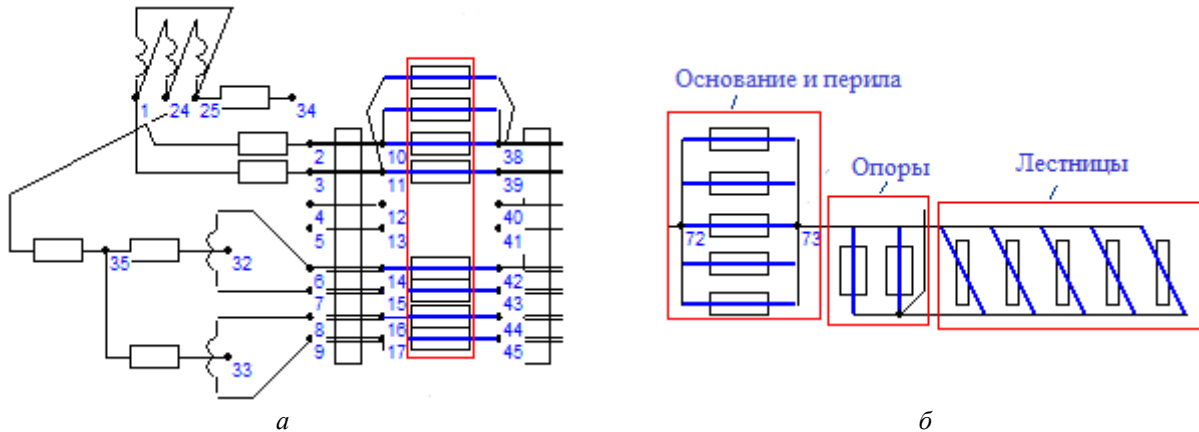


Рисунок 2 – Фрагменты схемы расчетной модели: *а* – часть модели тяговой сети; *б* – часть модели путепровода (рамкой выделен сегмент с короткими проводами)

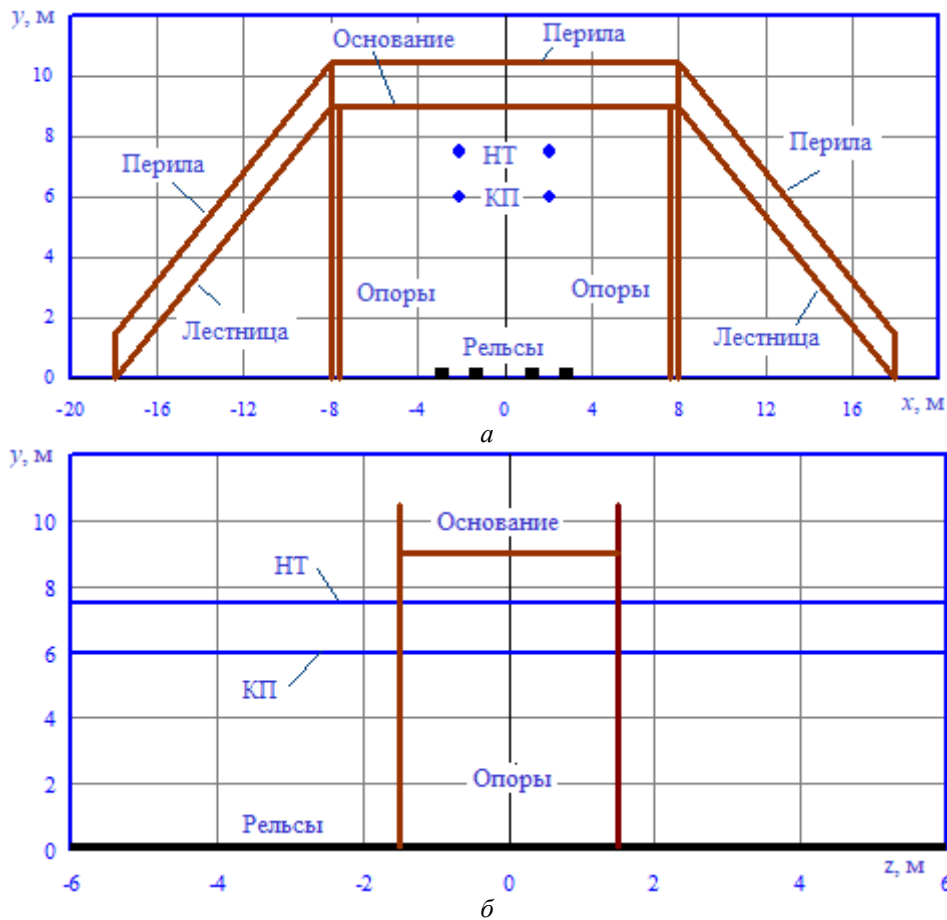


Рисунок 3 – Координаты расположения токоведущих частей и элементов путепровода: КП – контактные провода; НТ – несущие тросы

Представление модели участка тяговой сети отрезками коротких проводов сопряжено с выбором его протяженности L . Снижение напряженностей ЭМП на краях модели, вызванное ограниченной длиной отрезков, не должно сказываться в середине участка, поэтому величина L не должна быть слишком малой. С другой стороны, заложенные в алгоритм расчета ограничения на максимальный размер $\ell_0 = \frac{L}{n}$ элементарного отрезка вынуждают выбирать достаточно большое число его разбиений n , чтобы для расстояния s от точки наблюдения до каждого отрезка выполнялось условие $s \geq 3\ell_0$. Таким образом, протяженность участка тяговой сети определяется компромиссом между двумя противоречивыми требованиями. Кроме того, получение напряженностей ЭМП в середине короткого участка ТС, мало отличающееся от аналогичных величин длинного, является свидетельством адекватности предложенной в статье [11] методики.

Результаты моделирования. Выбор оптимальной длины короткого участка тяговой сети проведен сравнением рассчитанных напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м для середины короткого участка и начала следующего двухкилометрового участка (узлы 38 – 45 по схеме рисунка 2, а), для которого ЭМП определялось в плоскопараллельной постановке; при этом элементы, моделирующие путепровод, были удалены из схемы. В итоге была выбрана оптимальная длина короткого участка в 40 м при разбиении его на 200 элементарных отрезков по методике, предложенной в статье [11]. Результаты расчетов ЭМП для точки с координатами $x = 0$ и $z = 0$ приведены в таблице.

Результаты сопоставительных расчетов ЭМП на высоте 1,8 м

№ п/п	Метод	$E_{max}, \frac{kB}{M}$	$H_{max}, \frac{A}{M}$
1	ЭМП коротких проводов	3,20	77,67
2	Плоскопараллельное ЭМП	3,26	80,07
	Отличие ЭМП коротких проводов от плоскопараллельного поля, %	-1,8	-3,0

Полученные различия напряженностей ЭМП можно считать вполне приемлемыми для расчетов электромагнитного поля тяговой сети с учетом путепровода.

Результаты расчета ЭМП на высоте 1,8 м приведены на рисунках 4 – 7.

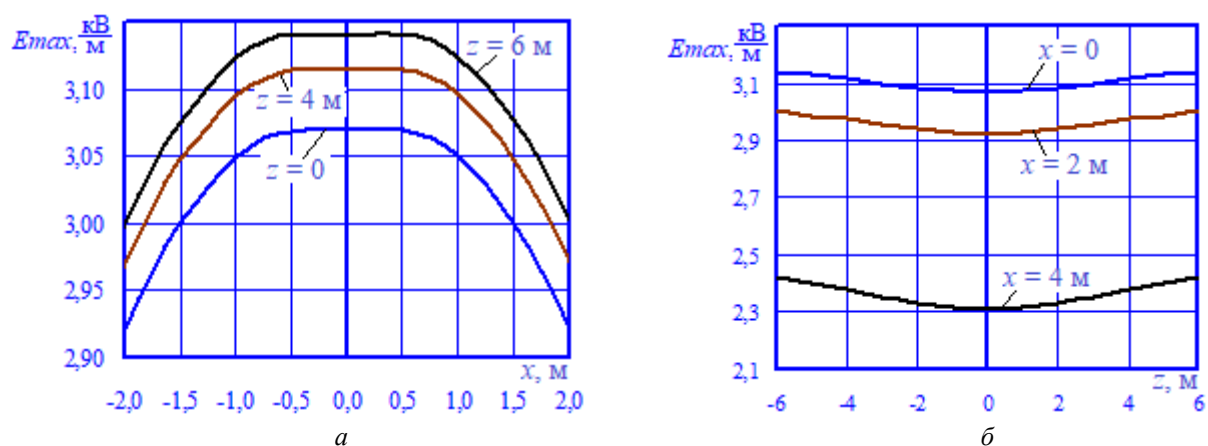


Рисунок 4 – Зависимости амплитуд напряженностей электрического поля от координат x (а) и z (б)

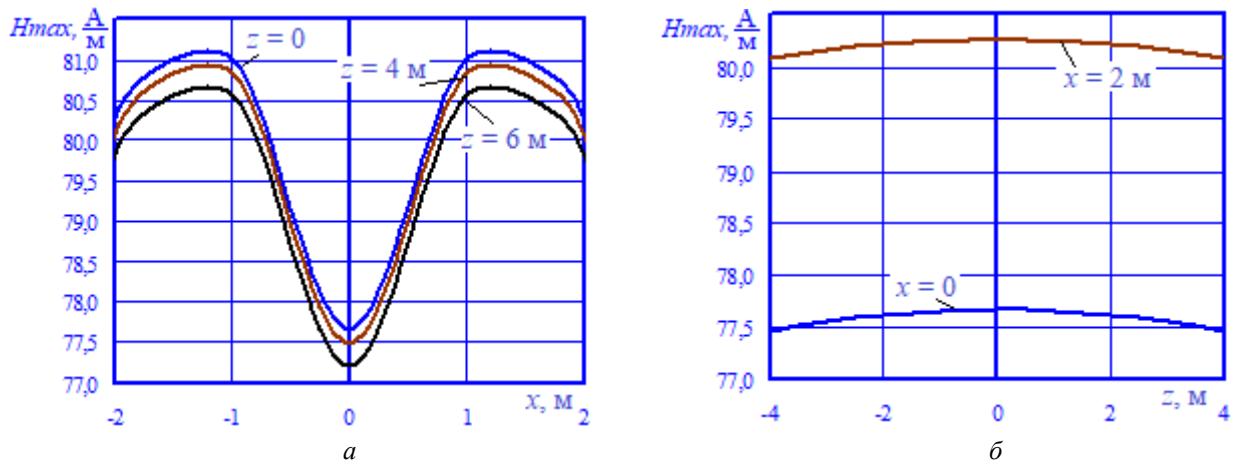


Рисунок 5 – Зависимости амплитуд напряженностей магнитного поля от координат x (а) и z (б)

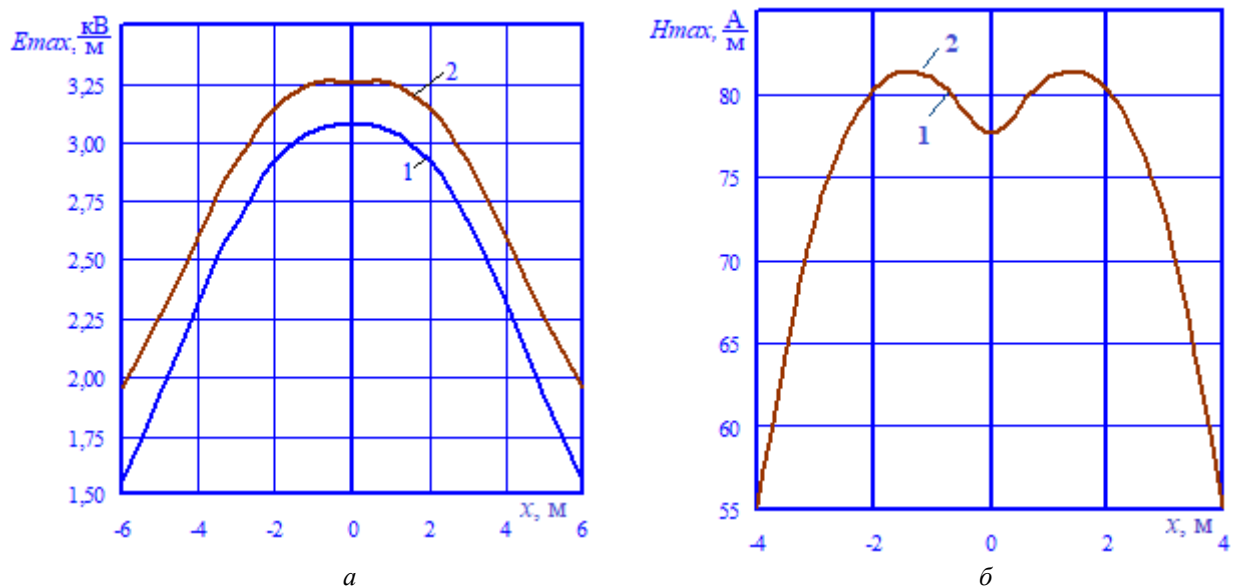


Рисунок 6 – Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей от координаты x при $z = 0$: 1 – при наличии путепровода; 2 – при отсутствии путепровода

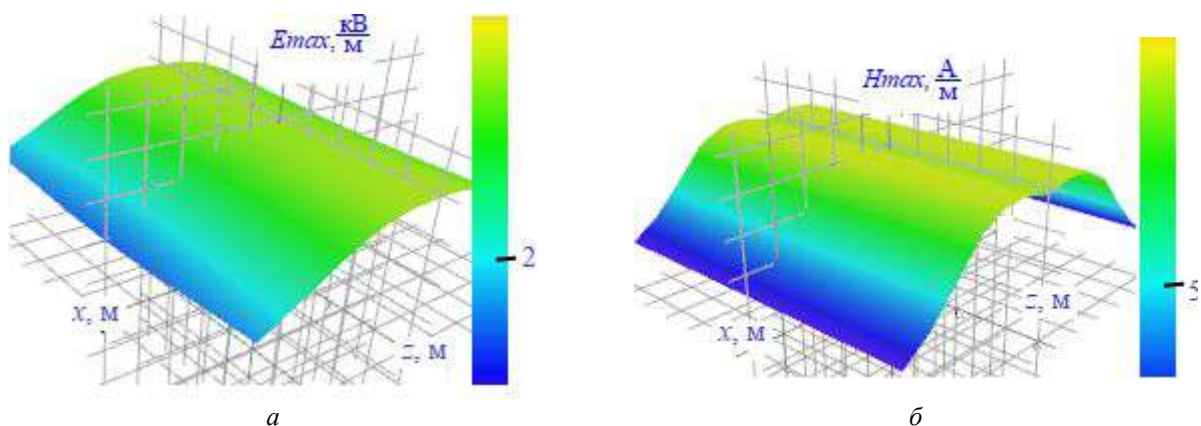


Рисунок 7 – Объемные диаграммы амплитуд напряженностей на высоте 1,8 м электрического (а) и магнитного (б) полей при наличии путепровода

Представленные на рисунках 4 – 7 графики дают возможность сделать вывод о том, что под путепроводом на высоте 1,8 м амплитуды напряженностей электрического поля уменьшаются. На оси сооружения ($z = 0$) максимальное снижение величины E_{max} за счет

заземленных конструкций достигает 20 %. Характер зависимости $H_{\max} = H_{\max}(x)$ при учете металлической конструкции не меняется.

На рисунках 8 – 11 приведены аналогичные зависимости, построенные для высоты 10,8 м, т. е. на высоте 1,8 м над путепроводом.

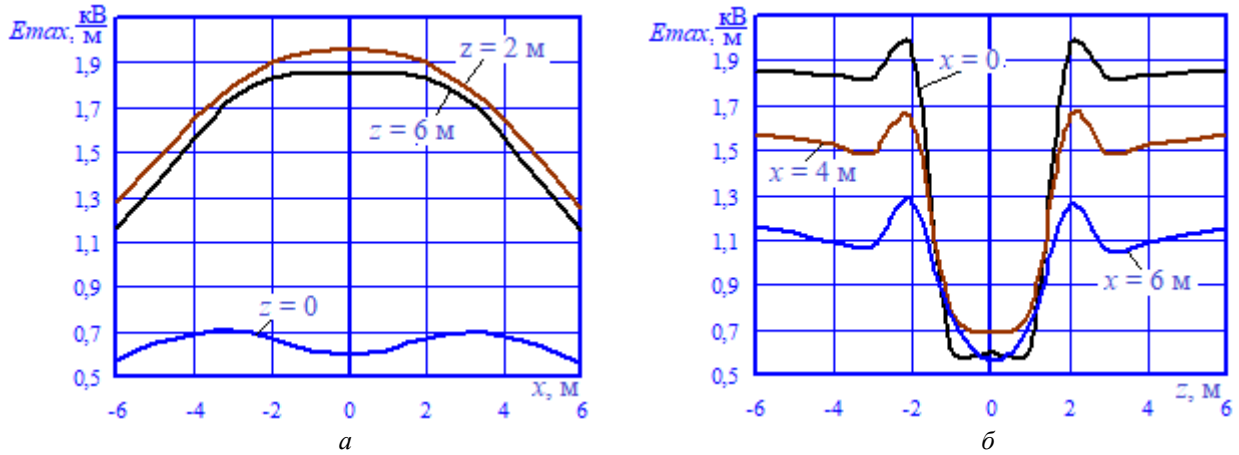


Рисунок 8 – Зависимости амплитуд напряженностей электрического поля на высоте 10,8 м от координат x (а) и z (б)

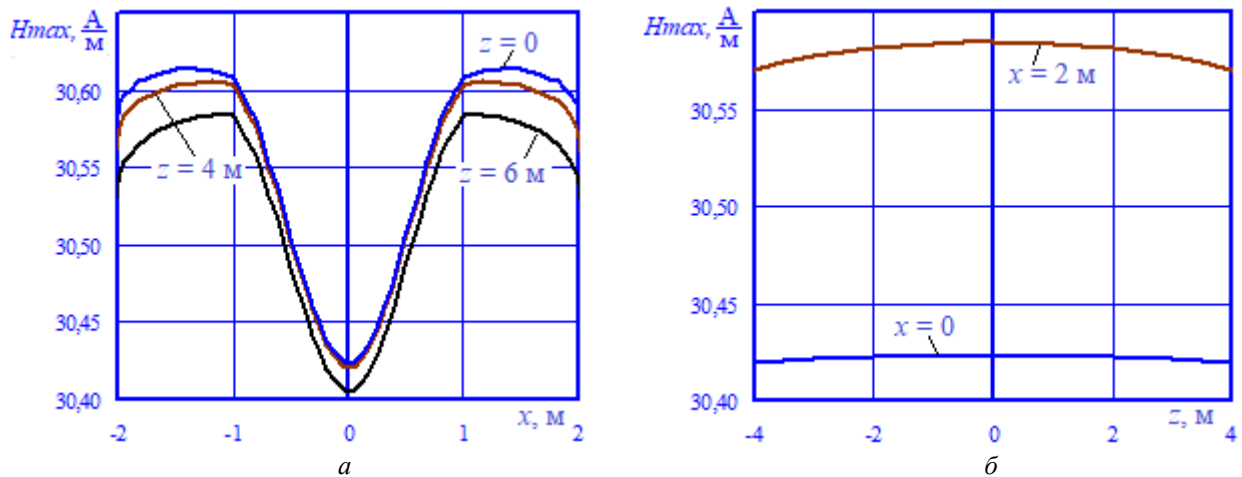


Рисунок 9 – Зависимости амплитуд напряженностей магнитного поля на высоте 10,8 м от координат x (а) и z (б)

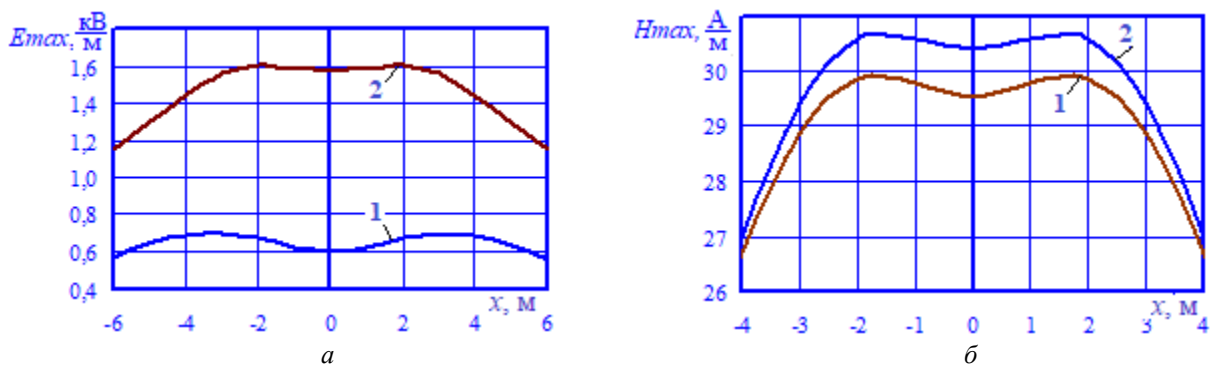


Рисунок 10 – Сравнительные графики зависимости амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 10,8 м от координаты x при $z = 0$: 1 – при наличии путепровода; 2 – при отсутствии путепровода

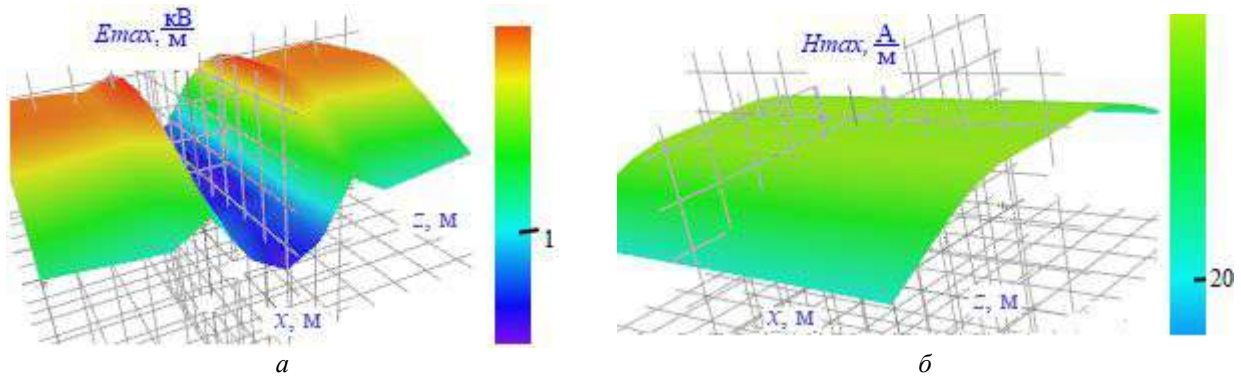


Рисунок 11 – Объемные диаграммы амплитуд напряженностей на высоте 10,8 м электрического (а) и магнитного (б) полей при наличии путепровода

Представленные на рисунках 8 – 11 графики позволяют сделать вывод о том, что при наличии путепровода над ним амплитуды напряженностей ЭМП уменьшаются по сравнению с его отсутствием; при $z = 0$ амплитуда E_{\max} снижается на 64 % за счет экранирующего действия перил, а кривая $H_{\max} = H_{\max}(x)$ практически не изменяется.

На рисунке 12 приведены результаты моделирования ЭМП на высоте 8 м, т. е. непосредственно под путепроводом. Для магнитного поля обе кривые совпадают. Необходимость такого анализа связана с тем, что на путепроводе может быть установлено оборудование, чувствительное к воздействию ЭМП, например, камеры видеонаблюдения.

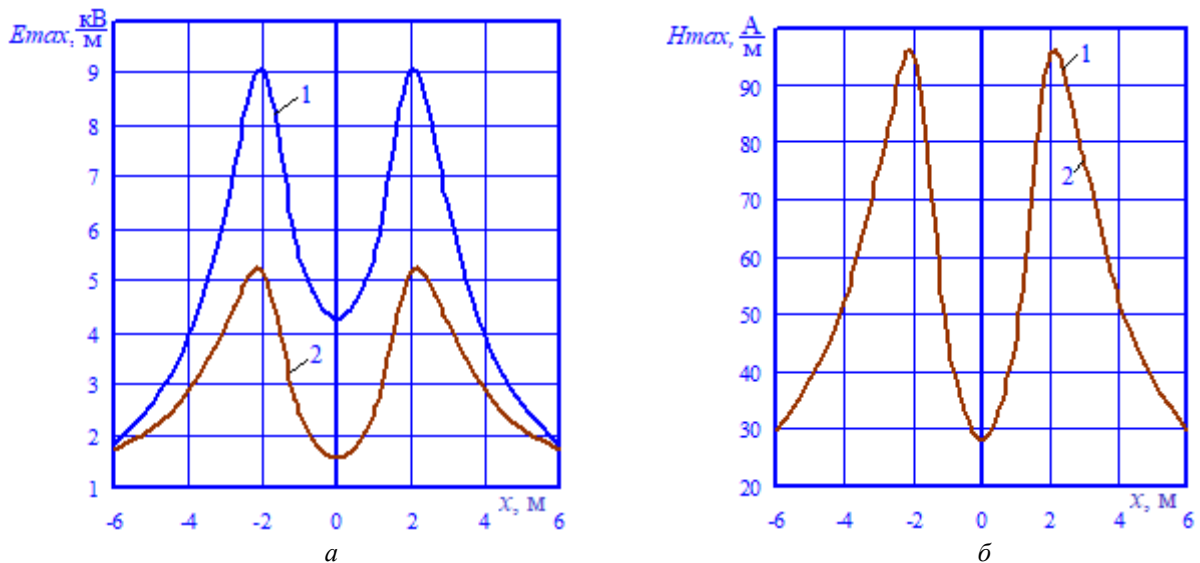


Рисунок 12 – Сравнительные графики амплитуд электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 8 м при $z = 0$ от координаты x : 1 – при наличии путепровода; 2 – при отсутствии путепровода

Из рисунка 12 следует, что при наличии заземленной конструкции напряженность электрического поля на высоте 8 м возрастает максимум на 75 %. Магнитное поле при наличии путепровода не изменяется.

Представленные расчеты показывают значительное влияние путепровода на электромагнитное поле тяговой сети, особенно существенное вблизи путепровода и непосредственно над ним.

Примененная методика является универсальной и может применяться для моделирования ЭМП практически любых проводящих конструкций небольшой длины.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».

1. Сидоров, А. И. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения / А. И. Сидоров, И. С. Окраинская. – Челябинск : Южно-Уральский государственный университет, 2008. – 204 с. – Текст : непосредственный.
2. Косарев, А. Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев. – Москва : Интекст, 2008. – 480 с. – Текст : непосредственный.
3. Буякова, Н. В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Ангарск : Ангарский государственный технический университет, 2018. – 382 с. – Текст : непосредственный.
4. Василенко, Я. В. Цифровизация российской электроэнергетики: современное состояние и перспективы развития / Я. В. Василенко. – Текст : непосредственный // Проблемы российской экономики на современном этапе : материалы всерос. науч.-практ. конф. / Российский гос. ун-т правосудия. – Москва, 2020. – С. 105–111.
5. Микаэльян, Е. Ю. Исследование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона, 2019. – № 8 (59). – С. 24. – EDN ZZDXHO.
6. Oancea C. D., Calin F. and Golea V. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
7. Zhang L., Zhu Y., Chen S. and Zhang D. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, Rome, Italy, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
8. Lu F., Zhu C., Yang Y., Yang H. Lu and Wang Z. The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 2029-2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
9. Zalesova O.V. Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934425.
10. Колосок, И. Н. Анализ кибербезопасности цифровой подстанции с позиций киберфизической системы / И. Н. Колосок, Е. С. Коркина. – Текст : непосредственный // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3 (15). – С. 121–131.
11. Закарюкин, В. П. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Текст : непосредственный // System analysis and mathematical Modeling. – 2021. – Т. 3. – № 2. – С. 145–163.
12. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Иркутский государственный университет, 2005. – 273 с. – Текст : непосредственный.
13. Закарюкин, В. П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Москва : Директ-Медиа, 2023. – 156 с. – Текст : непосредственный.
14. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / под ред. Е. С. Колечицкого. – Москва : Нац. исслед. ун-т «МЭИ», 2016. – 247 с. – Текст : непосредственный.
15. Блохин, Ю. В. К расчету электростатических полей методом эквивалентных зарядов / Ю. В. Блохин, Э. Н. Журавлев, Э. Н. Ярославский. – Текст : непосредственный // Электричество. – 1980. – № 2. – С. 26–31.

References

1. Sidorov A.I., Okrainskaia I.S. *Elektromagnitnye polia vblizi elektroustanovok sverkhvysokogo napriazheniia* [Electromagnetic fields near ultra-high voltage electrical installations]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2008, 204 p. (In Russian).
2. Kosarev A.B., Kosarev B.I. *Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniia zhelezodorozhnogo transporta* [Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems]. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p. (In Russian).
3. Buiakova N.V., Zakariukin V.P., Kryukov A.V. *Elektromagnitnaia bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniia zheleznykh dorog: modelirovanie i upravlenie* [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and management]. Angarsk, Angara State Technical University Publ., 2018, 382 p. (In Russian).
4. Vasilenko Ya.V. [Digitalization of the Russian electric power industry: current state and development prospects]. *Problemy rossiiskoi ekonomiki na sovremennom etape : materialy vs Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Problems of the Russian economy at the present stage : materials of the All-Russian scientific and practical conference]. Moscow, 2020, pp. 105-111 (In Russian).
5. Mikaelian E.Y., Chernykh V.N. Investigation of electromagnetic fields of the AC railroad section. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2019, no. 8 (59), p. 24 (In Russian).
6. Oancea C. D., Calin F. and Golea V. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
7. Zhang L., Zhu Y., Chen S. and Zhang D. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*, Rome, Italy, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
8. Lu F., Zhu C., Yang Y., Yang H. Lu and Wang Z. The Research on Electromagnetic Emission of Traction Network With Short-Circuit Current Pulse. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 2, pp. 2029-2036, June 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3115578.
9. Zalesova O.V. Estimation of Induced Voltage on the Dead Overhead Power Line caused by Electromagnetic Influence of the 25 kV AC Electric Railway System. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934425.
10. Kolosok I.N., Korkina E.S. An analysis of cyber security of a digital substation in terms of cyber physical system. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii – Information and mathematical technologies in science and management*, 2019, no. 3 (15), pp. 121-131 (In Russian).
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electromagnetic fields, created by the short wires. *System analysis and mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 145-163 (In Russian).
12. Zakariukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonesesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2005, 273 p. (In Russian).
13. Zakariukin V.P., Kryukov A.V. *Modelirovanie sistem tiagovogo elektrosnabzheniia postoiannogo toka na osnove faznykh koordinat* [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moscow, DirectMedia Publ., 2023, 156 p. (In Russian).
14. Kolechitskii E.S. ed. *Raschet elektricheskikh polei ustroystv vysokogo napriazheniia* [Calculation of electric fields of high voltage devices]. Moscow, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» Publ., 2016, 247 p. (In Russian).
15. Blokhin Yu.V., Zhuravlev E.N., Yaroslavskii E.N. On the calculation of electrostatic fields by the method of equivalent charges. *Elektrichestvo – Electricity*, 1980, no. 2, pp. 26-31 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Закарюкин Василий Пантелеймонович
 ООО «Smart grid».
 Рассветная ул., д. 2/2, Иркутская обл., р. п.
 Марково, 664528, Российская Федерация.
 Доктор технических наук, доцент, консультант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zakaryukin Vasily Panteleimonovich
 LLC «Smart Grid».
 Rassvetnaya st., 2/2, Irkutsk region, r. Markovo,
 664528, Russian Federation.
 Doctor of Sciences in Engineering, associate
 professor, consultant.

Тел.: +7 (3952) 41-33-93.
E-mail: zakar49@mail.ru

Phone: +7 (3952) 41-33-93.
E-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 674039, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, Российская Федерация.

Профессор кафедры электроснабжения и электротехники, ИРНИТУ.

Тел.: +7 (3952) 59-78-87.

E-mail: and_kryukov@mail.ru

Kryukov Andrey Vasil'evich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 674039, Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport ISTU.

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

Lermontova str., 83, Irkutsk, Russian Federation.

Professor of the Department of Electrical Supply and Electrical Engineering, INRTU.

Phone: +7 (3952) 59-78-87.

E-mail: and_kryukov@mail.ru

Воронина Екатерина Викторовна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 674039, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7 (902) 545-88-48.

E-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

Voronina Ekaterina Viktorovna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 674039, Russian Federation.

Postgraduate student at the Department of Electric Power Engineering of Transport Ports, ISTU.

Phone: +7 (902) 545-88-48.

E-mail: eka7erina.voronina@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Закарюкин, В. П. Моделирование электромагнитных полей тяговой сети 25 кВ с учетом металлических конструкций порталного типа / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. В. Воронина. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 131 – 141.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Voronina E.V. Simulating electromagnetic fields of a 25 kV traction network near portal-type metal structures. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 131-141 (In Russian).

УДК 621.316:621.317

П. Ю. Худяков¹, А. Ю. Кисельников¹, И. М. Старцев^{1,2}

¹Технический университет УГМК (ТУ УГМК), г. Верхняя Пышма, Российская Федерация;

²Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ВАНН

Аннотация. В статье рассмотрен один из способов повышения коэффициента использования тока при проведении электролитического рафинирования цветных металлов в промышленных объемах, а именно точная и своевременная идентификация наличия коротких замыканий между анодами и катодами в электролизной ванне. Отмечено, что иные методы идентификации имеют ряд недостатков, которые снижают общую эффективность процесса электролиза. Описаны особенности разработки программно-аппаратного комплекса измерения токов анодов и катодов электролизной ванны. Разработан опытный образец измерительной части системы, для которого были проведены стендовые испытания с использованием реальной уравнивающей шины и изолятора. Используемые токовые нагрузки при проведении исследований были сопоставимы с реальными нагрузками при электролизе меди в условиях цеха. Показано, что для выбранного варианта размещения чувствительного элемента сохраняется линейная зависимость между величиной тока, протекающего через

анод и интенсивностью магнитного поля электрода. При этом влияние полей токов уравнивающей шины на результаты измерения является незначительным. Рассмотрены вопросы аппаратной реализации системы передачи данных для датчика длиной 6 м и более с количеством анодов не менее 64 штук, в качестве наиболее помехозащищенного варианта выбран интерфейс RS485. Предложен способ интеграции в стационарную систему мониторинга параметров и идентификации коротких замыканий при электрическом рафинировании меди с использованием беспроводной сети передачи данных ZigBee с малым электропотреблением конечного узла. Приведен способ организации электропитания оборудования от уравнивающих шин ванны с разностью напряжения от 0,5 В и выше. Разработана структурная схема верхнего уровня системы.

Ключевые слова: электролизная ванна, датчик Холла, короткое замыкание, электролитическое рафинирование меди, анализ данных.

Pavel Yu. Khudyakov¹, Andrey Yu. Kiselnikov¹, Ivan M. Startsev^{1,2}

¹UMMC Technical University (TU UMMC), Verkhnyaya Pyshma, the Russian Federation;

²Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, the Russian Federation

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR MEASURING ELECTRODE CURRENTS FOR THE STATIONARY MONITORING SYSTEM OF THE BASIC OPERATION PARAMETERS OF ELECTROLYSIS BATHS

Abstract. The paper discusses one of the ways for increasing of the current utilization factor when carrying out electrolytic refining of non-ferrous metals on an industrial scale, specifically accurate and timely identification of the presence of short circuits between anodes and cathodes in the electrolysis bath. It is noted that other identification methods have a number of disadvantages, which reduce the overall efficiency of the electrolysis process. The features of the development of a hardware and software complex for measuring currents of anodes and cathodes of an electrolysis bath are described. The prototype of the measuring part of the system was developed, for which bench tests were carried out using a real equalizing bus and an insulator. The current loads used during the research were comparable to real loads during copper electrolysis in a workshop environment. It is shown that for the selected placement of the sensitive element, a linear relationship between the magnitude of the current flowing through the anode and the intensity of the magnetic field of the electrode is maintained. At the same time, the influence of the equalizing bus current fields on the measurement results is insignificant. The issues of hardware implementation of a data transmission system for a sensor 6 or more meters long with a number of anodes of at least 64 pieces are considered; the RS485 interface is selected as the most noise-resistant option. The method has been proposed for integration into a stationary system for monitoring parameters and identifying short circuits during electrical copper refining using a ZigBee wireless data network with low power consumption of the end node. The method is given for organizing the power supply of the device from the equalizing busbars of the bath with a voltage difference of 0.5 V and above. A block diagram of the upper level of the system has been developed.

Keywords: electrolysis bath, Hall effect sensor, short circuit, copper electrorefining, data analysis.

Электролитическое рафинирование цветных металлов является неотъемлемой частью технологической цепочки при производстве меди и цинка. При этом большие объемы производства металла и большое количество ванн, а также высокая плотность тока вызывают ряд серьезных проблем в части возникновения коротких замыканий в процессе электролиза [1 – 6]. Применение подходов, используемых при электролизе редкоземельных металлов, и диагностика тока по каждой конкретной цепи для идентификации случаев коротких замыканий связаны с высокими капитальными затратами и аппаратными сложностями. В результате указанных выше факторов было принято решение выполнить разработку программно-аппаратного комплекса измерения величины токов анодов и катодов электролизной ванны, а также прототипа стационарной системы мониторинга параметров электролизной ванны (напряжение на уравнивающих шинах, температура электролита, токи катодов) для повышения качества и энергоэффективности процесса электролиза.

Перейдем к описанию процесса работы электролизной ванны как электрической цепи. Схема замещения (рисунок 1) включает в себя контактное сопротивление анода $R_{сА}$, сопротивление электролита R_e , включенное последовательно с возникающей в электролите противозлектродвижущей силой E_r , а также контактное сопротивление катода $R_{сК}$.

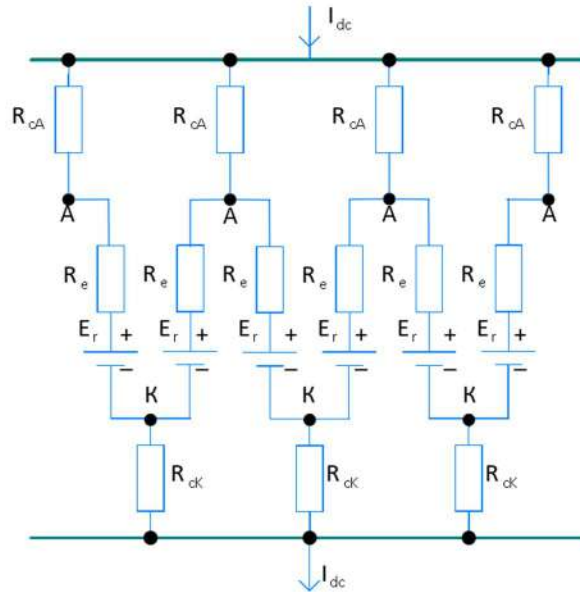


Рисунок 1 – Электрическая схема замещения электролизной ванны при электролитическом рафинировании меди

Исходя из приведенной схемы сопротивления между парой «анод – катод» (точки на схеме А и К) могут различаться из-за разного положения электродов, состава и температуры электролита, контактного сопротивления между электродами и шиной.

Под действием постоянного напряжения $U_{ИПТ}$ источника постоянного тока ИПТ, подводимого к аноду и катоду, по цепи электрохимической системы «анод – электролит – катод» протекает постоянный ток I_{dc} . В результате электрохимических процессов, вызванных протеканием тока I_{dc} в электролизере, на аноде происходит процесс растворения меди:



Процесс сопровождается образованием примеси, переходящей в электролит и анодный шлам, а на катоде происходит процесс выделения меди:



Масса меди m , выделившаяся на катоде при электролизе, согласно первому закону Фарадея пропорциональна количеству электричества Q , подведенному к электролизеру и электрохимическому эквиваленту $k_{эx}$:

$$m = k_{эx} \cdot Q. \quad (3)$$

Электрохимический эквивалент $k_{эx}$ численно равен массе меди, выделяющейся на катоде при прохождении единицы количества электричества $(\frac{г}{А \cdot ч})$.

В соответствии со вторым законом Фарадея электрохимический эквивалент меди пропорционален его химическому эквиваленту k_x :

$$k_{эx} = C \cdot k_x = \frac{k_x}{F}, \quad (4)$$

где $C = \frac{I}{F}$ – постоянная для всех веществ, $[\frac{г-ЭКВ}{Кл}]$;

$F = 96500, [\frac{Кл}{моль}]$ – число Фарадея.

Число Фарадея определяет неизменное по величине количество электричества 96500 Кл, необходимое для выделения любого вещества при электролизе, по величине равного химическому эквиваленту k_x .

Масса меди, осаждаемая на катоде при протекании постоянного тока через электрохимическую систему, может быть рассчитана по формуле:

$$m = k_{\text{эx}} \cdot I \cdot t, \quad (5)$$

где I – сила тока, протекающего через пару «анод – катод», А;

t – время протекания тока через электролизную ванну (продолжительность электролиза), ч.

Фактически масса выделившегося металла $m_{\text{ф}}$ меньше теоретического значения, определенного с использованием законов Фарадея. Эта особенность характеризуется показателем «выход металла при электролизе по току»:

$$\gamma = \frac{m_{\text{ф}}}{m}. \quad (6)$$

Чем ближе величина полученного при электролизе металла $m_{\text{ф}}$ к величине расчетного значения m , тем выше оценивается ведение технологического процесса, т. е. его эффективность или коэффициент использования тока.

Согласно уравнению Максвелла ток, протекающий через проводящую среду, создает магнитное поле в перпендикулярном направлении движения заряда. Напряженность этого магнитного поля зависит от вектора плотности тока \vec{J} и изменения плотности электрического поля D в любой заданной точке:

$$\nabla \cdot H = \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (7)$$

Электролитические процессы, протекающие при электролизе меди, характеризуются длительными циклами (до недели). Скорость изменения (нарастания) тока невелика, поэтому ток, протекающий через катоды, можно определить путем измерения магнитного поля вблизи уравнивательных шин.

Как показали ранее проведенные исследования [2, 3, 7], использование переносных систем диагностики или тепловизионных систем не позволяет в полной мере реализовать концепцию мониторинга комплекса параметров и быстрого устранения замыканий. Попытки же использовать метод измерения напряжения на уравнивательных шинах также не дают ощутимого результата. Количество катодов в ванне составляет от 60 штук для медного производства, а напряжение на ванне не превышает 1 В и чаще находится в пределах 0,35 – 0,5 В. В случае возникновения короткого замыкания между анодом и катодом ток через данную пару возрастает в 1,5 – 2 раза по сравнению с номинальным, а замыкание не приводит к значительному уменьшению напряжения на ванне из-за большого количества ячеек. По этой причине отсутствуют методы идентификации наличия замыкания в электролизной ванне с высокой достоверностью, основанные только на измерении напряжения уравнивательных шин. Нерешенной остается и проблема определения конкретной пары «анод – катод» в ванне с наличием замыкания. Однако основной мировой производитель электролизных ванн рекомендует именно этот метод идентификации [8].

В результате анализа указанных выше недостатков был предложен вариант измерения величины тока конкретного анода (катада) вблизи уравнивательной шины. Концептуально идея состояла в том, чтобы расположить датчики магнитного поля, работающие на эффекте Холла, под анодами со стороны ванны (рисунок 2). Использование датчиков магнитного поля с верхней стороны катодов дало положительный эффект при поиске случаев коротких замыканий с использованием переносных методов, при этом уменьшение расстояния до точки контакта шины и катода должно было позволить получить большую чувствительность.

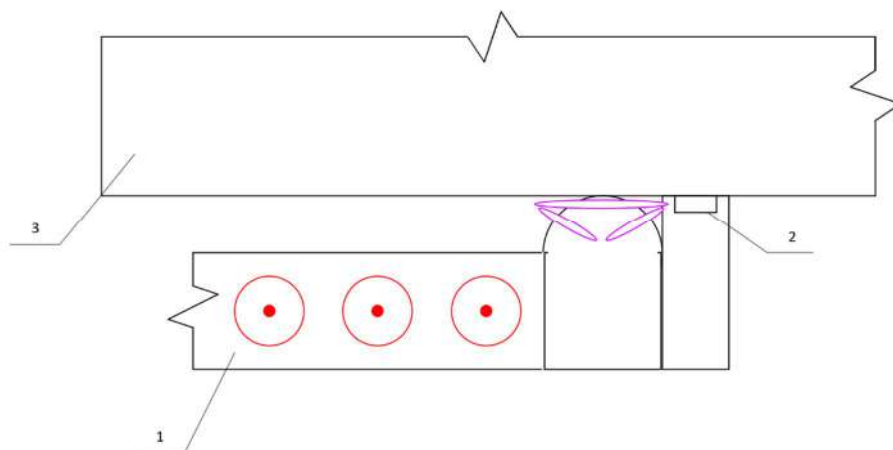


Рисунок 2 – Линии тока и магнитного поля при взаимодействии с датчиком:
1 – уравнивательная шина; 2 – катод; 3 – датчик магнитного поля

Выбор места установки датчика был обусловлен необходимостью снижения механических нагрузок при перегрузке электродов из ванны и особенностями текущей эксплуатации ванн. В существующей конструкции цеха электролиза, для которого проводились исследования, использование современного крана и системы позиционирования практически полностью исключает задевания электродом датчика при установке и выгрузке из ванны. При деформации шины или изолятора датчик за счет конструкции и наличия люфта остается в безопасном состоянии с точки зрения механической целостности.

Для проверки работоспособности системы был собран экспериментальный стенд, приведенный на рисунке 2. Конструкция состояла из отрезка уравнивательной шины и трех медных пластин, установленных на расстоянии, равном расстоянию между электродами в цехе.

Под каждым электродом, имитирующим катод, был установлен датчик магнитного поля с аналоговым выходом, который далее был подключен к аналого-цифровому преобразователю (АЦП). Задание токовой нагрузки проводилось источником постоянного тока в диапазоне от 50 до 190 А на катод, что сопоставимо с токовыми нагрузками цеха (до 670 А). Дополнительно ток через каждый электрод контролировался токовыми клещами. Результаты измерений для серии экспериментов приведены на рисунке 3.

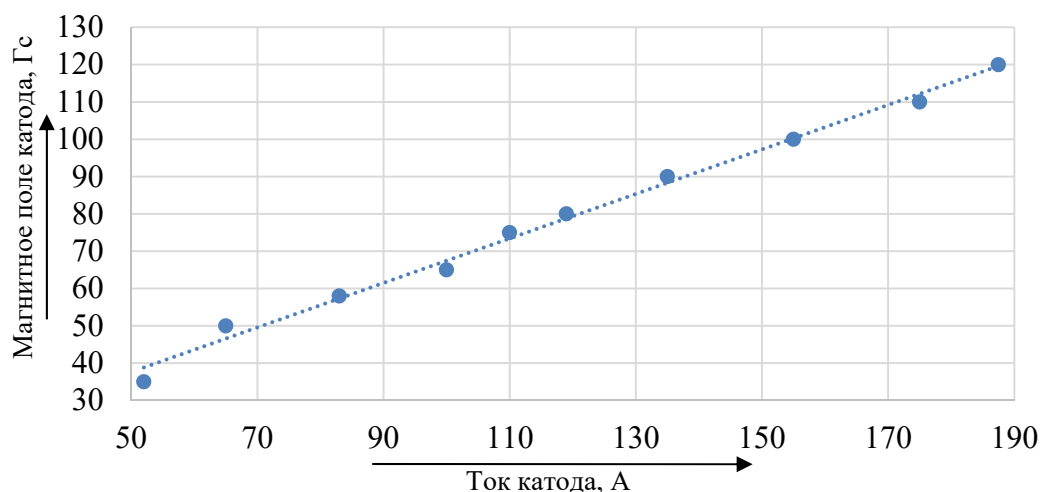


Рисунок 3 – График зависимости магнитного поля катода от величины тока

Из графика, приведенного на рисунке 3, видно, что несмотря на близкое расположение уравнивательной шины к месту установки датчика существует явная линейная зависимость

между величиной тока катода и магнитным полем, что соответствует теоретическим аспектам. При этом перетоки электрической энергии по уравнивательной шине не оказывают значительного влияния на результаты измерения.

Следующим шагом при разработке системы была проработка варианта сбора данных с 64 датчиков электролизной ванны, именно такое количество катодов используется в текущей конструкции ванны. Использование длинных линий связи и АЦП не представлялось возможным из-за низкой помехозащищенности, при этом отсутствуют датчики магнитного поля с цифровым интерфейсом для передачи, который можно использовать для указанного количества устройств и с необходимым уровнем помехозащищенности. Как правило, датчики Холла с цифровым выходом производятся с интерфейсом *I2C* или *SPI*. Указанный на структурной схеме набор устройств позволяет опросить два датчика магнитного поля на один микроконтроллер и передать данные по интерфейсу *RS485*, что дает возможность получить высокую помехозащищенность шины при передаче данных мастеру. Структурная схема измерительной части системы приведена на рисунке 4.

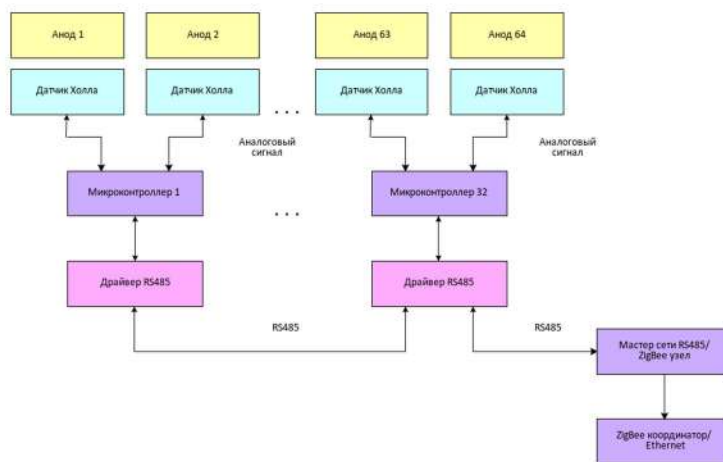


Рисунок 4 – Структурная схема измерительной части системы

Попытки использования иных интерфейсов передачи данных не позволили получить высокую стабильность работы, в итоге разработчики остановились на более дорогом и более надежном варианте. Прототип измерительной части был собран и протестирован как на стенде, так и на элементе шин реальной ванны.

Для полноценной реализации системы на каждую из ванн устанавливается линейка датчиков, которые сводятся в один шкаф сбора и передачи данных на три ванны. Питание системы осуществляется от уравнивательных шин. Разности потенциалов двух удаленных уравнивательных шин на двух ваннах достаточно для обеспечения системы электрической энергией (рисунок 5).

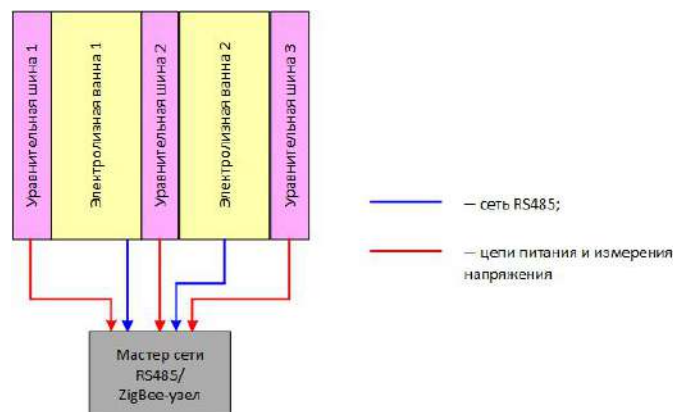


Рисунок 5 – Структурная схема кабельных связей ванн и измерительной части системы

Передача данных в систему сбора осуществляется по сети *Zigbee*, которая также на протяжении нескольких лет успешно эксплуатируется в условиях цеха электролиза меди.

Таким образом, использование системы мониторинга параметров работы электролизных ванн позволяет не только оперативно идентифицировать наличие коротких замыканий и своевременно их устранять, но и производить анализ при наличии архивов с большой глубиной выборки и выстраивать корреляцию с другими параметрами работы цеха, в том числе установить связь с исходным сырьем и примесями. Наибольшего экономического эффекта можно достигнуть при внедрении подобных систем для цехов с коэффициентом использования тока менее 95 %, в этом случае сроки окупаемости системы будут сопоставимы с внедрением переносных систем идентификации, а также будут достигнуты дополнительные эффекты от внедрения систем анализа данных.

Список литературы

1. Бледнов, Б. П. Электролитическое рафинирование меди и никеля / Б. П. Бледнов. – Красноярск : Красноярская государственная академия цветных металлов, 2000. – 81 с. – Текст : непосредственный.
2. О применении системы поддержки принятия решений в гидрометаллургии меди / Д. Н. Гронь, Е. А. Гронь, О. В. Кирякова [и др.]. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22721> (дата обращения: 25.01.2024).
3. Хоанг, Н. Х. Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди / Н. Х. Хоанг, В. Ю. Бажин. – Текст : электронный // Известия вузов. Цветная Metallургия. – 2023. – Т. 29. – № 3. – С. 5–16.
4. Wiechmann E.P., Munoz L.G., Aqueveque P.E., Henriques J.A., Vidal G.A. Triple segmented intercell bar: a contribution in cooper electrowinning. *Towards Clean Metallurgical Processing for Profit, Social and Environmental Stewardship. Proceedings of the 51st Annual conference of the Metallurgists of CIM (COM 2012)*, 2012, pp. 211-220.
5. Forner E.L., Miller G.M., Scheepers J., du Toit A.J. Copper electrowinning circuit design: optimised costing as a function of cell arrangement, productivity, rectifier size and throughput. *Proceedings of Copper Cobalt Africa, Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, pp. 1141-1148.
6. Wiechmann E.P., Morales A.S., Aqueveque P.E., Burgos R.P. Measurement of Cathodic Currents in Equipotential Inter-cell Bars for Copper Electrowinning and Electrorefining Plants. *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting, 2007*, pp. 2074-2079.
7. Автоматическая система идентификации коротких замыканий в электролизных ваннах / П. Ю. Худяков, С. В. Федорова, А. Ю. Симонов [и др.]. – Текст : непосредственный // Датчики и системы. – 2020. – № 9-10 (251). – С. 61–66.
8. CSS001 CellSensorTM User Manual Outotec Oyj // <https://fccid.io> : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://fccid.io/VTD-CSS001/User-Manual/User-manual-908646> (дата обращения: 19.01.2024).

References

1. Blednov B.P. *Elektroliticheskoe rafinirovaniye medi i nikelya* [Electrolytic refining of copper and nickel]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Academy of Non-Ferrous Metals Publ., 2000, 81 p. (In Russian).
2. Gron D.N., Gron Ye.A., Kiryakova O.V., Lapina L.A., Zharinova N.Yu. About application of system decision support in hydrometallurgy copper. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2015, no. 2-2. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22721> (accessed 25.01.2024).
3. Hoang N.H., Bazhin V.Yu. Improvement of monitoring and control system for copper electrolytic refining parameters. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia Metallurgiiya – Izvestiya. Non-ferrous metallurgy*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 5-16 (In Russian).

4. Wiechmann E.P., Munoz L.G., Aqueveque P.E., Henriques J.A., Vidal G.A. Triple segmented intercell bar: a contribution in cooper electrowinning. *Towards Clean Metallurgical Processing for Profit, Social and Environmental Stewardship. Proceedings of the 51st Annual conference of the Metallurgists of CIM (COM 2012)*, 2012, pp. 211-220.

5. Forner E.L., Miller G.M., Scheepers J., du Toit A.J. Copper electrowinning circuit design: optimised costing as a function of cell arrangement, productivity, rectifier size and throughput. *Proceedings of Copper Cobalt Africa, Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2018, pp. 1141-1148.

6. Wiechmann E.P., Morales A.S., Aqueveque P.E., Burgos R.P. Measurement of Cathodic Currents in Equipotential Inter-cell Bars for Copper Electrowinning and Electrorefining Plants. *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting, 2007*, pp. 2074-2079.

7. Khudyakov P.Yu., Fedorova S.V., Simonov A.Yu., Startsev I.M., Laptev V.A. Automatic short circuit identification system in electrolysis baths. *Datchiki i sistemy – Sensors & Systems*, 2020, no. 9-10 (251), pp. 61-66 (In Russian).

8. CSS001 CellSensorTM User Manual Outotec Oyj. Available at: <https://fccid.io/VTD-CSS001/User-Manual/User-manual-908646> (accessed: 19.01.2024).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Худяков Павел Юрьевич

Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования «Технический университет УГМК» (НЧОУ ВО «ТУ УГМК»).

Успенский пр., д. 3, г. Верхняя Пышма, 624091, Российская Федерация.

Кандидат физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», НЧОУ ВО «ТУ УГМК».

Тел.: +7 (34368) 78-362.

E-mail: lumen_xp@mail.ru

Кисельников Андрей Юрьевич

Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования «Технический университет УГМК» (НЧОУ ВО «ТУ УГМК»).

Успенский пр., д. 3, г. Верхняя Пышма, 624091, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», НЧОУ ВО «ТУ УГМК».

Тел.: +7 (34368) 78-362.

E-mail: oacy_kis@mail.ru

Старцев Иван Михайлович

Негосударственное частное образовательное учреждение высшего образования «Технический университет УГМК» (НЧОУ ВО «ТУ УГМК»).

Успенский пр., д. 3, г. Верхняя Пышма, 624091, Российская Федерация.

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС).

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

Доцент кафедры «Энергетика» НЧОУ ВО «ТУ УГМК», старший преподаватель кафедры «Электроснабжение транспорта», УрГУПС.

Тел.: +7 (912) 272-68-44.

E-mail: startsevivan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khudyakov Pavel Yur'evich

UMMC Technical University (TU UMMC).

3, Uspenskiy st., Verhnyaya Pyshma, 624091, the Russian Federation.

Ph. D., head of the department «Automation of the technological processes and production», TU UMMC.

Phone: +7 (34368) 78-362.

E-mail: lumen_xp@mail.ru

Kiselnikov Andrey Yur'evich

UMMC Technical University (TU UMMC).

3, Uspenskiy st., Verhnyaya Pyshma, 624091, the Russian Federation.

Ph. D., associate professor of the department «Automation of the technological processes and production», TU UMMC.

Phone: +7 (34368) 78-362.

E-mail: oacy_kis@mail.ru

Startsev Ivan Mihailovich

UMMC Technical University (TU UMMC).

3, Uspenskiy st., Verhnyaya Pyshma, 624091, the Russian Federation.

Ural State University of Railway Transport (USURT).

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

Ph. D., associate professor of the department «Energetics», TU UMMC, senior Lecturer of the department «Power supply for transport», USURT.

Phone: +7 (912) 272-68-44.

E-mail: startsevivan@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Худяков, П. Ю. Разработка программно-аппаратного комплекса измерения токов электродов для стационарной системы мониторинга основных параметров работы электролизных ванн / П. Ю. Худяков, А. Ю. Кисельников, И. М. Старцев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 141 – 149.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khudyakov P.Yu., Kiselnikov A.Yu., Startsev I.M. Development of the software and hardware complex for measuring electrode currents for the stationary monitoring system of the basic operation parameters of electrolysis baths. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 141-149 (In Russian).

УДК: 629.4

И. И. Лакин

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ НАСТУПЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Аннотация. Предметом рассмотрения являются современные автоматизированные системы технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава с использованием предлагаемых методов управления на базе теории нечетких множеств с целью повышения качества прогнозов остаточного ресурса оборудования локомотивов при проведении их сервисного обслуживания и ремонта. Система ремонта должна строиться как киберфизическая производственная система (CPPS), в основе которой лежат объединенные в единую информационную систему аппаратно-программные комплексы, алгоритмы, которые строятся по правилам формальной логики, дающей точные, но ограниченные результаты. Для расширения функциональных возможностей алгоритмов необходимо применение индуктивных и диалектических логических методов управления, но и они ограничены применением четких множеств, что на практике приводит к неточным выводам. Понятия «Тяжеловесный состав», «Допустимая масса поезда» и другие при четком задании границ не позволяют видеть проблемы при приграничных значениях. Напротив, в теории нечетких множеств, где принадлежность к множеству носит вероятностный характер, существенно расширяются возможности автоматического анализа, в том числе при управлении рисками наступления отказов. Целью статьи является разработка перспективной системы управления надежностью и техническим состоянием тягового подвижного состава с использованием данных бортовой системы технического диагностирования. Предложен алгоритмический математический метод разработки системы управления надежностью подвижного состава с использованием как «классических» логических методов, так и новых на базе теории нечетких множеств, позволяющих устранить логические проблемы. Предложен метод определения формы переходной функции принадлежности. На основании разработанного метода определения риска наступления отказов создано программное обеспечение на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel. Результатом работы является разработка методического подхода к решению задач управления надежностью тягового подвижного состава, который используется автором в его дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, тяговый подвижной состав, надежность, автоматизированное управление рисками наступления отказов.

Igor I. Lakin

Railway Engineering Center, Moscow, the Russian Federation

TRACTION ROLLING STOCK FAILURES RISK MANAGEMENT USING THE FUZZY SETS THEORY METHODS

Abstract. The subject of consideration is modern automated maintenance and repair systems of traction rolling stock using the proposed control methods based on the fuzzy sets theory in order to improve the quality of forecasts of the residual life of locomotive equipment during their maintenance and repair. The repair system should be built as a cyberphysical production system (CPPS), which is based on hardware and software complexes combined into a single information system, algorithms that are built according to the rules of formal logic, giving accurate but limited results. To expand the functionality of the algorithm, it is necessary to apply inductive and dialectical logical control methods, but they are also limited by the use of clear sets, which in practice leads to inaccurate conclusions. The concepts of «Heavy train», «Permissible train weight» and others, with a clear definition of boundaries, do not allow you to see

problems with boundary values. On the contrary, in the fuzzy sets theory, where belonging to a set is probabilistic in nature, which makes it possible to significantly expand the possibilities of automatic analysis, including when managing the risk of failure. The purpose of the article is to develop a promising system for managing the reliability and technical condition of traction rolling stock using data from the on-board technical diagnostics system. An algorithmic mathematical method is proposed for developing a rolling stock reliability management system using both «classical» logical methods and new ones based on the fuzzy sets theory that eliminate logical problems. A method for determining the shape of the transitional membership function is proposed. Based on the developed method for determining the risk of failure, software has been created in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA) in the MS Excel environment. The result of the work is the development of a methodological approach to solving problems of reliability management of traction rolling stock, which is used by the author in his further research.

Keywords: railway transport, traction rolling stock, reliability, automated failure risk management.

Системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) тягового подвижного состава развиваются в условиях четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0), когда создание современной автоматизированной системы управления надежностью тягового подвижного состава – это цифровая трансформация существующей системы эксплуатации и ТОиР. Современное производство должно создаваться как «Киберфизическая производственная система» (Cyber Physical Production System, CPPS) [1], когда автоматизированные системы управления на базе IT-технологий объединяются в единую систему для решения общей интегрированной задачи управления. Этот тренд имеет место и на железнодорожном транспорте [2].

Критический анализ логических методов управления. В основе алгоритмов менеджмента, в том числе диагностирования и управления ТОиР, лежат законы формальной логики [4], которые определяют строгие правила построения умозаключений с целью получения новых знаний через четыре закона [5].

Закон исключенного третьего предполагает два ответа: «истина» («true», 1) или «ложь» («false», 0): утверждения $A < B$, $A = B$, $A > B$ имеют либо ложное значение, либо истинное. В алгоритмах закон представлен оператором условного перехода «if ... then». Также используется множественный оператор условного перехода, например, «Select ... Case». Возникает проблема при неопределенности значений переменных – $A = nil$, $B = nil$ – или когда их значение определено с ограниченной вероятностью.

Закон непротиворечия исключает возможность двух и более противоречивых утверждений: не может одновременно быть $A < B$ и $A > B$. Соблюдение закона в алгоритмах не формализовано и требует контроля.

Дополнительный закон достаточного основания важен при принятии решений на основании ограниченного объема данных. Например, при условии, что $A < B$, а $B < C$, и наличии информации, что $A < C$, можно утверждать, что $A < B$. При диагностировании часто используются косвенные признаки. Например, срабатывание быстродействующего выключателя является косвенным признаком наличия отказа в силовых цепях.

Формальная логика имеет недостатки. Первоначальное ее рассмотрение как теории мышления признано несостоятельным. Именно поэтому появились новые направления развития логических методов. Разработаны основы индуктивной логики [5]: плюс к принципу «от общего к частному» предложен «от частного к общему».

Индукция выдвигает нулевые гипотезы и подтверждает ее частными случаями наблюдения. Например, «При проверке тормозных колодок при пробеге в 500 тыс. км их толщина всегда предельна и требуется замена. Поэтому при очередном заходе поезда на ремонт необходимо подготовить переходной запас тормозных колодок». «У сорока ранее осмотренных вагонов обнаружены следы вандализма – есть вероятность, что и в 41-м вагоне будут порчи». Эти методы имеют вероятность достоверности $P < 1$ и ошибки $Q = 1 - P$.

Отдельно следует отметить проблему неопределенности, известную как «парадокс кучи» [5]: если из кучи зерен убирать по одному зерну, когда куча перестанет существовать? Понятие «куча» четко не определено. Понятия «удовлетворенный клиент», «комфортабельный салон», «интеллектуальная система управления», «профессиональное ведение поезда», «перепробег

поезда», «высокая надежность», «напряженный трафик» и много других не имеют точного определения, но позволяют строить дедуктивные умозаключения, хотя могут приводить к парадоксам. Нечеткость определения термина нарушает принцип двужанности суждений (истина/ложь). Например, грузовой поезд массой 7000 т при установленной 7100 т по здравому смыслу является тяжеловесным, по формальным признакам – нет. При этом масса 3000 т точно не тяжеловесная, а с 7100 т – точно тяжеловесная.

Пример. Пусть тяжеловесным поездом считается поезд массой от 7100 т и на его движение на руководящий подъем наложено ограничение минимальной скорости в 40 км/ч по условиям перегрева тяговых электродвигателей (ТЭД). Тогда возникает проблема: а у состава массой 7099 т или при скорости 39,99 км/ч есть риск перегрева ТЭД? При четком определении категорий нарушений нет, но фактически есть риск отказа.

Отказы первой категории железнодорожной техники определены как приведшие к задержке поезда на 1 час и более [7]. Причиной может быть отключение одного ТЭД. Но при задержке поезда на 59 минут теряются данные по отказам остальных ТЭД – снижается эффективность управления надежностью.

Другие примеры: высокоскоростные поезда должны следовать строго по расписанию – какую задержку следует считать опозданием: 1 с, 1 мин, 5 мин? Интенсивность отказов не должна превышать $\lambda \leq 1,25$ отказов на 1 млн км – а $\lambda = 1,26$ следует считать недопустимо низкой надежностью? Электрический аппарат должен сработать за 250 мс после подачи управляющего сигнала – следует ли считать отказом срабатывание за 251 мс? Приведенные примеры показывают, что четкие понятия со строго заданными предельными значениями параметров на практике приводят к снижению эффективности управления надежностью.

Таким образом, при создании модели управления надежностью следует предусмотреть учет недостатков методов формальной логики.

Возможности теории нечетких множеств. Выход из логических парадоксов формальной логики предложен в 60-е гг. XX в. выдающимся американским математиком и логиком Лотфи Заде [8, 9], который ввел понятия «нечеткая логика» и «нечеткие множества» (Fuzzy Sets), позволившие в значительной степени связать математику и программирование с присущим человеку интуитивным способом коммуникации. Основным понятием является собственно нечеткое множество A , которое задается множеством входящих в него элементов $x \in X$ и функцией принадлежности $\mu_A(x) \in \{0, 1\}$ этих элементов к множеству:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}. \quad (1)$$

Для каждого нечеткого множества A можно найти значения $x \in X$, когда $\mu_A(x) = 0$ (точно не принадлежит) или $\mu_A(x) = 1$ (точно принадлежит). В примере с тяжеловесными поездами масса поезда m принадлежит множеству возможных масс поезда M : $m \in [0, 9000]$. При массе поезда $m \geq 7100$ т поезд считается тяжеловесным: $\mu(m \geq 7100) = 1$, а при массе меньше 3000 т является легковесным: $\mu(m \leq 3000) = 0$. Для массы поезда $m \in \{3000, 7100\}$ функцию принадлежности к тяжеловесным поездам $\mu(m)$ можно определить так:

$$\mu(3000 > m > 7100) = (m - 3000) / 4100. \quad (2)$$

Другой пример – функция принадлежности скорости $v \in \{0, 90\}$ к нарушению скоростного режима на руководящем подъеме. Здесь график имеет отрицательный наклон:

$$\mu(30 > v > 50) = 1 - (v - 30) / 20. \quad (3)$$

Другой пример функции принадлежности диагностического сигнала «Температура в салоне» $t \in \{0, 50\}$ к комфортной:

$$\mu(17 > t > 20) = 1 - (v - 17) / 3, \mu(25 > t > 28) = (28 - v) / 3. \quad (4)$$

Таким образом, теория нечетких множеств предлагает метод для описания категорий без жестко установленных пределов контролируемого параметра.

Форму функции принадлежности $\mu_l(x)$ желательно определять по физическим процессам, протекающим в объекте. Например, часовой ток I тягового электродвигателя НБ-514Е по условиям перегрева ТЭД $I = 880$ А, а ток длительного режима $I = 790$ А. Выделяемое тепло зависит от квадрата тока $C \equiv I^2$, поэтому принадлежность тока к часовому является параболической.

Допустимо определять форму кривой функции принадлежности μ по критичности. Например, принадлежность скорости к максимально допустимой должна иметь выпуклый график, а допустимая температура нагрева изоляции – наоборот: вогнутый. Таким образом, форма функции принадлежности $\mu_l(x)$ – самостоятельная тема для анализа при разработке модели ТООР.

Отказ Q согласно ГОСТ 27.002–2015 [10] определен как «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния», может быть «полным или частичным» – сразу появляется нечеткость в измерении надежности в числе отказов. Кроме того, у отказа могут быть разные последствия. Например, отказ тягового электрического двигателя может проявиться как необходимость заменить электрическую щетку в коллекторно-щеточном аппарате (при техническом обслуживании и ремонте отказом не считается), а может привести к необходимости капитального ремонта (КР). И то и другое будет отказом ТЭД. Если же принять капитальный ремонт за полный отказ $\mu(\text{КР}) = 1$, замену якоря $\mu(\text{якорь}) = 0,5$, моторно-якорного подшипника $\mu(\text{МЯП}) = 0,5$, а щетки $\mu(\text{щетка}) = 0,001$, то надежность ТЭД можно оценить как сумму нечетких отказов с отнесением к выполненной работе: времени работы, пробегу, тонно-километровой работе или затраченной энергии в киловатт-часах (проще работу измерять как пробег в миллионах километров: исследования автора показали, что коэффициент корреляции r между возможными показателями работы одной серии локомотива на одном полигоне работы превышает 0,9).

Пусть в депо эксплуатируются 100 восьмиосных электровозов со среднесуточным пробегом 700 км. За месяц было произведено 1000 замен электрических щеток, 20 замен якоря, 10 замен моторно-якорных подшипников и 5 ТЭД подлежали капитальному ремонту. Общий пробег ТЭД в депо за месяц составил $L = 100 \cdot 30 \cdot 700 \cdot 8 / 1000000 = 16,8$ млн км. При этом в «четкой логике» произошло $N = 20 + 10 + 5 = 35$ отказов, а «четкая» наработка на отказ $\lambda_{\text{ч}} = N / L = 35 / 16,8 = 2,08$ отказа на 1 млн км. Учет отказов с применением теории нечетких множеств позволяет более адекватно оценивать надежность ТЭД:

$$\lambda_{\text{н}} = (1000 \cdot 0,001 + 20 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,3 + 5 \cdot 1) / 16,8 = 19 / 16,8 = 1,13 \text{ отказа на 1 млн км.}$$

Микропроцессорные системы управления (МСУ) локомотивов для повышения надежности дублированы: если один полукомплект отказал, то машинист переключением тумблера переводит работу МСУ на второй. При заходе локомотива на ПТОЛ отказавший полукомплект заменяется на исправный из перехода. С точки зрения эксплуатационной надежности локомотива отказа не было. Однако для конструкторов МСУ этот отказ необходимо учесть для анализа надежности. Нечеткая логика позволяет устранить проблему, придав каждому виду отказа числовое значение $\mu_{\text{мсу}} \in \{0, 1\}$ в зависимости от стоимости ремонта и последствий: если отказ МСУ привел к задержкам в перевозочном процессе, то отказ должен учитывать не только стоимость восстановления, но и стоимость потерь перевозочного процесса. Если, например, МСУ отказал 50 раз с успешным переходом на второй полукомплект (при $\mu_{\text{мсу}} = 0,1$), то в четкой логике число отказов будет таким:

$$\begin{aligned} - \lambda_{\text{ч}} &= N / L = 0 / 16,8 = 0 \text{ отказов на 1 млн км (отказы оказались скрыты);} \\ - \text{в нечеткой логике: } \lambda_{\text{н}} &= 50 \cdot 0,1 / 16,8 = 5 / 16,8 = 0,3 \text{ отказа на 1 млн км.} \end{aligned} \quad (5)$$

В группе компаний ЛокоТех во всех 85 сервисных локомотивных депо внедрена автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) локомотивов АСУ «Сетевой график» [11, 12], в которой обнаруженные отказы или даже просто замечания по работе локомотива из всех источников (бортовой журнал локомотива формы ТУ-152, МСУ, визуальная приемка локомотива в ремонт и др.) фиксируются в электронном журнале ТУ-28Э (диагностическая карта), после чего мастер назначает слесарям сверхцикловые дополнительные работы, по каждой из которых регистрируются трудовые затраты, расход запасных частей и материалов (в штуках и рублях). Таким образом, можно всегда рассчитать стоимость устранения любого отказа. Если при этом произошел заход локомотива на неплановый ремонт, то следует добавить стоимость доставки локомотива в депо и потери перевозочного процесса (пока такой методики на железнодорожном транспорте нет). При капитальном ремонте $\mu_{\text{ТОиР}} = 1$. В других случаях $\mu_{\text{ТОиР}} < 1$. Таким образом, предлагаемая технология учета отказов с использованием теории нечетких множеств практически реализуема в АСУ ТОиР.

В ОАО «РЖД» в информационной системе КАС АНТ [7] проблему четкого понятия «отказ» предложено решать через введение первой, второй и третьей категорий отказа в зависимости от последствий для перевозочного процесса. Но проблема осталась. Например, отказом первой категории считается опоздание пассажирского поезда более чем на 5 мин, опоздание на 4 мин 59 с не будет отказом первого рода.

Таким образом, для оценки эффективности эксплуатации и надежности электропоездов от «четких» допусков (были необходимы при ручной технологии обработки данных) в АСУ следует перейти к нечетким множествам A с плавно меняющимся значением заданной функции принадлежности $\mu_A \in \{0, 1\}$. Для понятия «отказ» в зависимости от его последствий следует перейти от бинарных утверждений принадлежности (истина/ложь) к вероятностным, что существенно повысит объективность мониторинга технического состояния локомотивов.

Следующий случай использования теории нечетких множеств – это нечеткая логика. При управлении надежностью она применима при управлении рисками, где риск уже оценивается через вероятность Q наступления потенциально опасного события. Например, если в цехе нарушается техника безопасности, то есть риск травмы, если произошла частичная потеря работоспособности локомотива – риск опоздания поезда, если ТЭД работал с током 1200 А более 5 мин – риск пробоя изоляции, если напряжение в контактной сети было завышенным – риск кругового огня по коллектору. Если электрический аппарат срабатывает медленно, существует риск его отказа. Очевидно, что все приведенные логические построения трудно использовать в АСУ без применения нечетких множеств. И наоборот: введение функций принадлежности по каждому используемому понятию сразу делает задачу управления рисками возможной к автоматизации и использованию в АСУ как фонового процесса мониторинга рисков.

Применительно к предыдущим примерам логическое утверждение будет выглядеть так: если нарушены весовая норма поезда (событие A) или скоростной режим (событие B), то есть риск R отказа тяговых электродвигателей в течение сорока ближайших дней (пробой изоляции). В четкой логике это означает следующее:

$$\text{If } A \text{ or } B \text{ then } R = 1, \quad (6)$$

в нечеткой логике выражение (6) будет иметь вид:

$$R = \mu_A(m) + (1 - \mu_A(m)) \cdot \mu_B(v) \leq 1, \quad (7)$$

где $m \in M$ – возможные массы поезда;

$v \in V$ – возможные скорости поезда;

$\mu_A \in \{0, 1\}$ и $\mu_B \in \{0, 1\}$ – функции принадлежности текущих значений $\mu_A(m)$ и $\mu_B(v)$ опасным событиям A (нарушение весовой нормы) и B (нарушение скоростного режима).

Формула является обратимой, и ее можно записать в виде:

$$R = \mu_B(v) + (1 - \mu_B(v)) \cdot \mu_A(m). \quad (8)$$

Пример: если весовая норма нарушена $\mu_A(m) = 0,75$, а скоростной режим нарушен $\mu_B(v) = 0,45$, то риск отказа

$$R = 0,75 + (1 - 0,75) \cdot 0,45 = 0,45 + (1 - 0,45) \cdot 0,75 = 0,8625.$$

Согласно ГОСТ Р 27.102–2021 исправное состояние трактуется как соответствие всем требованиям, установленным в документации на объект. Неисправным считается состояние, когда хотя бы один параметр $x \in X$ вышел за пределы требований. На практике, если параметр x близок к допускам x_d ($x \approx x_d$), то уже есть риск R выхода параметра за допуски. Поэтому во время ТОиР желательно добиваться наличия параметров в более жестких допусках. Рассмотрим пример.

Минимальный угол открытия тиристорov α_0 выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) электровозов переменного тока существенно влияет на устойчивость работы ВИПов. При напряжении в контактной сети в 25 кВ $\alpha_0 \geq 9^\circ$. Высокое значение α_0 приведет к потере энергоэффективности ВИПов: возрастет реактивная энергия, понизится коэффициент мощности: $\alpha_0 \leq 14^\circ$. При этом желательна настройка минимального угла открытия тиристорov как можно ближе к значению $\alpha_0 = 9^\circ$. Важно, что правый и левый допуски определялись по разным принципам: безопасности и энергоэффективности.

Таким образом, допуски на параметры при ТОиР также следует задавать с использованием подходов теории нечетких множеств.

Если есть несколько взаимовлияющих допусков, то каждый допуск в отдельности может соблюдаться, но при этом быть прижатым к одному краю допуска. Тогда возникает риск отказа, что было исследовано в докторской диссертации И. П. Исаева. В этом случае риск неисправности можно оценить как произведение функций принадлежности к неисправному состоянию. Рассмотрим пример риска неисправности блока управления минимальным углом открытия тиристорov α_0 по предыдущему примеру. Задержанный угол открытия тиристорov α_{03} для вторых плеч управления должен формироваться так:

$$\alpha_{03} = \alpha_0 + \Delta + \gamma, \quad (9)$$

где Δ – минимальная задержка α_{03} по отношению к α_0 ;

γ – угол коммутации тиристорov.

Риск неисправности ВИПа R при предлагаемом подходе можно оценить формулой

$$R = 1 - \mu_\alpha(\alpha). \quad (10)$$

Риск отказа ВИПа $R_{\text{вип}}$ возникнет как произведение рисков несоответствия исправному состоянию α_0 , Δ и γ с соответствующими функциями принадлежности к исправному состоянию $\mu_\alpha(\alpha)$, $\mu_\Delta(\Delta)$, $\mu_\gamma(\gamma)$ и рисками R_α , R_Δ , R_γ :

$$R_{\text{вип}} = R_\alpha \cdot R_\Delta \cdot R_\gamma = (1 - \mu_\alpha(\alpha)) \cdot (1 - \mu_\Delta(\Delta)) \cdot (1 - \mu_\gamma(\gamma)). \quad (11)$$

Таким образом, задавая или диагностируя параметры системы, определяя принадлежность сигналов к исправному состоянию, можно определять риск R отказа тягового подвижного состава как произведение рисков отказов R_n оборудования, $n \in N$:

$$R = \prod_{n=1}^N R_n = \prod_{n=1}^N (1 - \mu_n(x_n)), \quad (12)$$

где $\mu_n(x_n)$ – функция принадлежности оборудования n к исправному при текущем значении параметра x_n .

Математическое моделирование рисков отказов с использованием методов теории нечетких множеств. Рассмотрим использование теории нечетких множеств для расчета рисков отказов при наличии нарушений режимов эксплуатации. Пусть есть множество опасных режимов эксплуатации A , состоящее из отдельных нарушений $A_i \in A$, где $i \in \{1, 2, \dots, \max\}$. Наступление события x_i из множества A_i приводит к отказу с вероятностью P_i (определяется статистически). Событие x_i принадлежит к множеству нарушений A_i с функцией принадлежности $f_{A_i}(x_i) \in \{0, 1\}$ (обозначение f использовано вместо μ из-за отсутствия такого символа в VBA). Тогда риск наступления отказа после наступления события x_i

$$P_i(x) = P_i \cdot f_{A_i}(x_i) \leq 1. \quad (13)$$

Функция принадлежности обычно имеет три диапазона:

- 1) $x < x_1$: $f(x) = 0$ – параметр x точно не принадлежит множеству A ;
- 2) $x_1 < x < x_2$ – принадлежность параметра x множеству A определяется через $f(x)$;
- 3) $x > x_2$ – параметр x точно принадлежит множеству A ($f(x) = 1$).

Для исследования возможностей теории нечетких множеств применительно к управлению рисками отказов автором написана программа на алгоритмическом языке Visual Basic for Application (VBA) в среде MS Excel [6]. Основу программы составляют функции (*Function*) F_1, F_2, \dots, F_{12} , реализующие 12 видов функций принадлежности $f_1(x_0), f_2(x_0), \dots, f_{12}(x_0)$, где x_0 – относительное значение параметра x в переходной зоне:

$$x_0 = 0 \text{ при } x < x_1, x_0 = 1 \text{ при } x > x_2, x_0 = (x - x_1) / (x_2 - x_1). \quad (14)$$

Для моделирования функций f написана программа *Sub Demo*.

Функции $f_1(x_0)$ и $f_2(x_0)$ являются линейными:

$$f_1(x_0) = x_0, f_2(x_0) = 1 - f_1(x_0). \quad (15)$$

Функции $f_3(x_0), f_4(x_0), f_5(x_0), f_6(x_0)$ являются квадратичными и желательны к применению, если нарушение одной из границ не влечет за собой резкого изменения степени принадлежности к множеству A , а с другой границы – влечет:

$$f_3(x_0) = x_0^2, f_4(x_0) = 1 - f_3(x_0), f_5(x_0) = 1 - f_3(1 - x_0), f_6(x_0) = 1 - f_5(x_0). \quad (16)$$

Функции $f_7(x_0), f_8(x_0), f_9(x_0), f_{10}(x_0)$ соответствуют аperiodическому (инерционному) звену второго порядка, когда с обеих границ требуется плавное или, наоборот, – резкое изменение функции принадлежности. Аperiodическое звено смоделировано с помощью квадратичных функций:

$$x_0 < 0,5: f_7(x_0) = 0,5 \cdot f_3(2 \cdot x_0); x_0 \geq 0,5: f_7(x_0) = 0,5 + 0,5 \cdot f_3(2 \cdot (x_0 - 0,5)). \quad (17)$$

Функции $f_{11}(x_0), f_{12}(x_0)$ соответствуют нормальному закону функции принадлежности. Для этого диапазон от x_1 до x_2 рассматривается как диапазон в $\{\pm 5 \cdot \sigma\}$, где σ – среднеквадратичное отклонение. Математическое ожидание $M = 10$, а $\sigma = 1$, а функция принадлежности f_N рассчитывается по формуле:

$$f_N(x) = (1/(\sigma \cdot (2 \cdot 3.14159)^{0,5})) \cdot \text{Exp}((-x - M)^2 / (2 \cdot \sigma^2)), \quad (18)$$

где $x = M - 5 \cdot \sigma \cdot (0,5 - x_0)$, тогда

$$f_{11}(x_0) = f_N(x) / f_N(M); f_{12}(x_0) = 1 - f_{11}(x_0). \quad (19)$$

Функции принадлежности для относительной переменной x_0 являются универсальными для логических построений при управлении рисками наступления отказов. В программе создан универсальный механизм расчета функции принадлежности (таблица 1). Расчет осуществляется с помощью процедуры *Sub A*, запускаемой аналогично *Sub Demo* сочетанием клавиш *Alt-F8*. В качестве исходных данных следует задать тип функции принадлежности, пределы переходной зоны нечеткого множества x_1 и x_2 , текущее значение параметра x , вероятность наступления отказа в случае принадлежности к множеству A_i .

Нарушение скоростного режима тяжеловесным поездом приводит к перегреву изоляции и риску дальнейшего пробоя в течение одного – двух месяцев. Проведенные исследования показывают, что вероятность пробоя изоляции P_2 при этом нарушении составляет 0,8.

Таблица 1 – Универсальная форма расчета функции принадлежности

i	Название A_i	Тип $f_i(x)$	x_1	x_2	x	P_i	$f(x)$	$f(x) \cdot P_i$
1	Тяжеловесный поезд, т	7	4000	6300	5100	1	0,457	0,457
2	Нарушение скоростного режима, км/ч	9	40	55	50	0,8	0,222	0,178
3	Нарушение весовой нормы, т	5	6300	6400	6350	0,9	0,750	0,675
4	Время работы с часовым током, мин	5	60	80	70	0,75	0,750	0,563
5	Время работы с пятиминутным током, мин	5	5	8	6	0,75	0,556	0,417
6	Превышение напряжения на ТЭД, В	8	1000	1300	1030	0,7	0,180	0,126

Риск отказа R_1 появится, если тяжеловесный поезд (функция A_1) нарушит скоростной режим (функция A_2):

$$R_1 = A_1 \text{ and } P_2 \cdot A_2. \quad (20)$$

Для множества A_1 «тяжеловесный поезд» выбрана функция принадлежности f_7 , для скоростного режима – f_9 . Применительно к Восточному полигону тяжеловесным считается поезд массой $x_2 = 6300$ т. Экспертной оценкой определено, что поезд массой $x_1 = 4000$ т не может считаться тяжеловесным. Аналогично в примере определены границы для скорости: $x_1 = 40$ км/ч, $x_2 = 55$ км/ч. Тогда для поезда массой $x = 5100$ т и скоростью проследования подъема $x = 50$ км/ч риск пробоя изоляции R_1 составит 0,081.

При наличии нескольких видов риска – R_1, R_2, \dots, R_j – общий риск наступления отказа будет определяться по формуле, также реализованной в программе:

$$R = R_1 + (1 - R_1) \cdot R_2 + (1 - R_1 - (1 - R_1) \cdot R_2) \cdot R_3 + \dots \quad (21)$$

В таблице 2 приведен результат расчета для примера по таблице 1. Риск пробоя изоляции R составляет 0,933.

Таблица 2 – Расчет риска пробоя изоляции для примера по таблице 1

Риск	Риск пробоя изоляции	R_i	$1 - R_{i-1}$
Риск R_1	Перегрев ТЭД на руководящем подъеме	0,081	0,081
Риск R_2	Перегрев ТЭД из-за высокой массы поезда	0,675	0,620
Риск R_3	Превышение часового тока	0,563	0,168
Риск R_4	Превышение пятиминутного тока	0,417	0,054
Риск R_5	Превышение напряжения на ТЭД	0,126	0,010
Общий риск отказа R		0,933	

Рассчитанные примеры с использованием разработанной программы в среде VBA Excel [14] подтвердили эффективность применения теории нечетких множеств для существенного расширения возможностей вероятностно-статистического управления рисками наступления отказов оборудования локомотивов.

При разработке модели ТОиР отечественных высокоскоростных электропоездов предлагается комплексно использовать дедуктивные и индуктивные методы формальной логики, методы диалектической логики и методы теории нечетких множеств, максимально отказываясь при этом от четких понятий как ограничивающих возможности анализа и управления.

При управлении надежностью оборудования производится диагностирование с использованием специфических для разных видов оборудования математических методов, после чего строится дедуктивное умозаключение об исправности (работоспособности) оборудования, наличии трендов к выходу параметров за допуски и др. Если полученной информации недостаточно для управления надежностью оборудования, то дополнительно используются индуктивные методы анализа – менее достоверные (вначале просто выдвигаются гипотезы), но более информативные.

Следующим этапом построенные алгоритмы переводятся на логику теории нечетких множеств с использованием функций принадлежности параметров к множествам параметров. Необходимо устранить все парадоксы четких множеств (субъектов) и действий над ними (предикатов) через переход на методы нечеткой логики.

Далее производится собственно анализ с принятием управленческих решений, которые должны соответствовать принципам диалектической логики, в том числе принципам перехода количества в качество, единству и борьбе противоположностей. Далее цикл управления надежностью повторяется по принципу постоянного улучшения Эдварда Деминга (цикл PDCA).

Список литературы

1. Cyber-Physical Production Systems / сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://connectedeverything.ac.uk/cyber-physical-production-systems-2> (дата обращения: 30.09.2023).
2. Семенов, А. П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Семенов Александр Павлович ; Российский ун-т транспорта. – Москва, 2021. – 379 с. – Текст : непосредственный.
3. ООП. – Текст : электронный. – URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/oop-obektno-orientirovannoe-programmirovanie/> (дата обращения: 30.09.2023).
4. Аристотель. Аналитики: первая и вторая / Аристотель. – Санкт-Петербург : Ленанд, 2021. – 440 с. – Текст : непосредственный.
5. Шибанова, Е. К. Логика. Курс лекций / Е. К. Шибанова. – Текст : электронный. – Челябинск : Челябинский ин-т Уральской акад. гос. службы, 2008. – 167 с. – <https://studfile.net/preview/5473928> (дата обращения: 30.09.2023).
6. Уокенбах, Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA : пер. с англ. – Москва : Вильямс, 2014. – 944 с. – Текст : непосредственный.
7. Методические указания по формированию анализа отказов в работе технических средств на региональном и линейном уровне управления на основе данных Комплексной автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАС АНТ) // утв. 29.10.2018 № 2313/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 253 с. – Текст : непосредственный.
8. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 166 с. – Текст : непосредственный.

9. Zadeh L.A. Fuzzy Sets – NY. *Information and control*, 1965, no. 8, pp. 338-353.
10. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Москва: Российский ин-т стандартизации, 2021. – 40 с. – Текст : непосредственный.
11. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис. Теория и практика : монография / К. В. Липа, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов [и др.]. – Москва : ЛокоТех, 2015. – 211 с. – Текст : непосредственный.
12. Лакин, И. И. Математические методы проверки достоверности данных о надежности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании / И. И. Лакин, В. А. Мельников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 66–73.
13. Техническое диагностирование электронного оборудования электровозов переменного тока / А. В. Горленко, И. К. Лакин, А. Л. Донской, Н. Г. Шабалин. – Москва : Транспорт, 1992. – 112 с. – Текст : непосредственный.
14. Лакин, И. И. Расчет риска отказов с использованием теории нечетких множеств : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617487. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ, 11.04.2023. – Текст : непосредственный.

References

1. Cyber-Physical Production Systems. Available at: [https:// connectedeverything.ac.uk/cyber-physical-production-systems-2](https://connectedeverything.ac.uk/cyber-physical-production-systems-2) (accessed 30.09.2023).
2. Semenov A.P. *Model' upravleniia zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniia* (A model for the locomotives life cycle managing using modern technical diagnostics methods). Doctor's of Sciences in Engineering thesis, Moscow, Russian University of Transport, 2021, 379 p. (In Russian).
3. OOP. Available at: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/oop-obektno-orientirovannoe-programmirovanie/> (application date 30.09.2023).
4. Aristotle. *Analitiki: pervaiia i vtoraiia* [Analysts: first and second]. Saint-Petersburg, Lenand Publ., 2021, 440 p. (In Russian).
5. Shibanova E.K. *Logika. Kurs lektsii* [Logic. Lectures Course]. Chelyabinsk, Chelyabinsk Institute of the Ural Academy of Public Administration Publ., 2008, 167 p. (In Russian).
6. Wokenbah, John. *Excel 2010: professional'noe programmirovanie na VBA* [Excel 2010: VBA professional programming]. Moscow, Wiliams Publ., 2014, 944 p. (In Russian).
7. Methodological guidelines for the formation of an analysis of failures in the operation of technical means at the regional and linear management level based on the data of an Integrated automated accounting system, control of the elimination of failures in the operation of technical means and analysis of their reliability (KASANT). Approved 29.10.2018 № 2313/p. Moscow, JSC «Russian Railways» Publ., 2018, 253 p. (In Russian).
8. Zadeh L.A. *Poniatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k priniatiuu priblizhennykh reshenii* [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976, 166 p. (In Russian).
9. Zadeh L.A. Fuzzy Sets – NY. *Information and control*, 1965, no. 8, pp. 338-353.
10. GOST P 27.102-2021 Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions. Moscow, Russian Institute of Standardization Publ., 2021. 40 p. (In Russian).
11. Lipa K.V., Pustovoy V.N., Lakin I.K. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiiia i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov v TMKh-Servis. Teoriia i praktika : monografiia* [Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives in TMH-Service. Theory and practice : monograph]. Moscow, LocoTech Publ., 2015, 211 p. (In Russian).
12. Lakin I.I., Melnikov V.A. Mathematical methods for reliability verification of data on reliability of locomotives, their operation and maintenance. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2022, no. 2 (50), pp. 66-73 (In Russian).

13. Gorlenko A.V., Lakin I.K., Donskoi A.L., Shabalin N.G. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie elektronного oborudovaniia elektrovozov peremennogo toka* [Technical diagnostics of electronic equipment of electric locomotives of alternating current]. Moscow, Transport Publ., 1992, 112 p. (In Russian).

14. Lakin I.I. *Certificate of state registration of the computer program No. 2023617487*, 11.04.2023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лакин Игорь Игоревич

АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ»).

Большой б-р ул., д. 40, БЦ Амальтея, этаж 3, Сектор А, Территория Сколково Инновационного центра, г. Москва, 121205, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи.

Тел.: +7-916-383-64-43.

E-mail: Lakin16@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lakin Igor Igorevich

JSC «Engineering Centre of Railway Transport» (JSC «EC RT»).

Bolshoy b-r st., 40, Amalthea Business Center, floor 3, sector A, Territory of the Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, leading expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group.

Phone: +7-916-383-64-43.

E-mail: Lakin16@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лакин, И. И. Управление рисками наступления отказов тягового подвижного состава с использованием методов теории нечетких множеств / И. И. Лакин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 149 – 159.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lakin I.I. Traction rolling stock failures risk management using the fuzzy sets theory methods. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2024, no. 1 (57), pp. 149-159 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала, соответствующим научным 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.

Правила представления материалов научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба» доступны в сети Интернет по адресу: <http://izvestia-transsiba.ru/to-authors/rules-of-submission-of-manuscripts>.

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»

№ 1 (57) 2024

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) – 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

Подписано в печать 25.03.2024.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 29.03.2024.

