

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 1(61)

2025

Транссиба



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 Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. **Горюнов Владимир Николаевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. **Гуда Александр Николаевич** – проректор по научной работе РГУПС, д.т.н., профессор (Ростов-на-Дону).
10. **Зыкина Анна Владимировна** – заведующая кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. **Исаков Александр Леонидович** – зав. кафедрой «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
12. **Ким Константин Константинович** – заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
13. **Комяков Александр Анатольевич** – 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** – профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, д.т.н., профессор (Санкт-Петербург).
18. **Лившиц Александр Валерьевич** – заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИРГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
19. **Лю Цзинькунь** – доктор, профессор, заместитель декана Школы гражданского строительства университета Сунь Ятсена (Жухай, Китай).
20. **Парамонов Александр Михайлович** – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУ, д.т.н., доцент (Омск).
21. **Сидоров Олег Алексеевич** – профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).
22. **Смердин Александр Николаевич** – первый проректор, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент (Омск).
23. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Подвижной состав» АЛТ Университета имени Мухамеджана Тынышпаева, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
24. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ТТГУ, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
25. **Харламов Виктор Васильевич** – заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор (Омск).

EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the advisor to the rector's office of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, professor of the department «Technologies of transport engineering and rolling stock repair» of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Alekseev Viktor Mikhailovich** – professor of the department of Information Control and Protection of RUT, D. Sc., professor (Moscow, Russia).
5. **Bessonenko Sergey Anatolevich** – 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 «Theoretical foundations of electrical engineering and power engineering» of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
13. **Komyakov Aleksandr Anatolevich** – 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** – professor of the department «Automation and telemechanics on railways» of PGUPS, D. Sc., professor (St. Petersburg, Russia).
18. **Livshits Alexandr Valerievich** – head of the department «Automation of Production Processes» of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
19. **Liu Jiankun** – 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 ALT of Muxamedzhan Tyynshpaev University, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
24. **Fayziybaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Locomotives and locomotive facilities» of TSTU, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
25. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

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

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

- Галков А. А., Худонов И. А. Моделирование устройства регулирования напряжения под нагрузкой для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ..... 2
- Михайлов М. С., Сидоров О. А., Сая И. Л. Совершенствование математической модели взаимодействия токоприемников с контактной подвеской..... 12
- Лукьянова О. А., Тарасов Ан. Н., Чертков И. Е., Тарасенко А. В. Повышение нагрузочной способности токоприемников электроподвижного состава за счет совершенствования системы охлаждения полоза..... 23
- Незевак В. Л., Скоков Р. Б., Павлова Р. В. Применение имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока для оценки качества электроэнергии..... 36

Управление процессами перевозок

- Попова И. М., Карнакова В. В. Совершенствование работы путей необщего пользования за счет применения современных информационно-управляющих систем..... 49
- Козлов В. Г. Прогнозирование эксплуатационных затруднений в работе железнодорожной станции на основе моделирования с использованием сетей Петри..... 59
- Кекиш Н. А., Пищик В. Г. Согласование критериев и наборов исходных данных при создании модели оптимальной обработки контейнеров на терминале..... 68
- Сатторов С. Б., Бозоров А. Ш., Бозоров Р. Ш. К вопросу нормирования времени нахождения вагонов на подъездном пути..... 77
- Аветисян А. С. Методологические основы оценки качества транспортного сервиса для нужд городского планирования..... 87
- Калинин К. А., Изюмников Д. В. Повышение эффективности управления процессами перевозок в крупных агломерациях через приоритетное обслуживание входящего потока заявок..... 96
- Грефенштейн А. П., Кагадий И. Н. Экономические аспекты использования контейнеров «Open Top» для перевозок каменного угля..... 107

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

- Джахьяева С. Б., Климова Е. В., Дульгер Н. В. Формирование транспортной системы Астраханской области при строительстве Северного обхода международного транспортного коридора «Север – Юг». 115
- Мухамедова З. Г., Ахмедов С. Х., Юлдашова Г. М. Разработка транспортно-логистической системы Узбекистана и графика движения контейнерных поездов..... 124
- Комяков А. А., Заренкова Ю. В., Голубков А. С. Применение анализа пространственно-временных паттернов движения такси с использованием алгоритмов кластеризации в проектировании сети зарядной инфраструктуры для электромобилей..... 133

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

УДК 621.331

А. А. Галков, И. А. Худонов

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 2×25 кВ

Аннотация. Предметом исследования, результаты которого представлены в данной статье, является регулирование напряжения в системе тягового электроснабжения, объектом исследования является устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), которое отвечает за регулировку напряжения в контактной сети, путем изменения коэффициента трансформации силового трансформатора тяговой подстанции. Данное устройство важно для поддержания требуемого уровня напряжения в контактной сети, но при работе в автоматическом режиме регулирования напряжения наблюдается высокий износ РПН. Это связано с тем, что износ устройства напрямую зависит от количества переключений, которое оно выполняет в сутки. В свою очередь частота переключений зависит от множества факторов, связанных с тяговой нагрузкой. Другой проблемой является различный уровень износа данного устройства на разных участках электроснабжения – на участках с равнинным профилем пути и низкой тяговой нагрузкой повреждаемость устройств РПН значительно ниже ввиду редких переключений для корректировки напряжения, а на участках со сложным профилем и высокой загруженностью РПН демонстрируют крайне низкую надежность, настолько, что персонал тяговых подстанций отключает автоматическое регулирование и выполняет переключения в ручном режиме.

С целью прогнозирования износа устройств РПН было решено создать компьютерную модель системы тягового электроснабжения 2×25 кВ в программном комплексе SimInTech, включающую в себя автоматическое регулирование напряжения в сети и счетчик числа переключений.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, трансформатор, регулирование напряжения, устройство регулирования напряжения под нагрузкой, электроснабжение, износ, надежность, компьютерное моделирование.

Alexander A. Galkov, Igor A. Khudonogov

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

MODELING OF SWITCHING COUNTER FOR ON-LOAD TAP CHANGER DEVICE FOR THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM 2×25 kV

Abstract. The subject of this article is voltage regulation in the traction power supply system. The object is the on-load voltage regulation device (OLTC), which is responsible for regulating the voltage in the contact network by changing the transformation ratio of the power transformer of the traction substation. This device is important for maintaining the required voltage level in the contact network, but when operating in automatic voltage regulation mode, high wear of the OLTC is observed. This is due to the fact that the wear of the device directly depends on the number of switching operations it performs per day. In turn, the frequency of switching operations depends on many factors associated with the traction load. Another problem is the different levels of wear of this device in different sections of the power supply - in sections with a flat track profile and low traction load, the damage to OLTC devices is significantly lower due to rare switching operations to adjust the voltage, and in sections with a complex profile and high load, the OLTC demonstrate extremely low reliability, so much so that the personnel of traction substations turn off automatic regulation and perform switching operations manually.

In order to predict the wear of the OLTC devices, it was decided to create a computer model of the traction power supply system, including automatic voltage regulation in the network, and a switching counter

As a result of the work done, a computer model of the traction power supply system of the 2×25 kV traction system was created in the SimInTech software package, which shows the operation of the automatic regulation system with a switching counter.

Keywords: traction power supply system, transformer, voltage regulation, on-load tap changer, electric power supply, wear, reliability, computer modeling.

Практически все современные трансформаторы и автотрансформаторы оборудованы устройствами, позволяющими регулировать напряжение без отключения нагрузки – РПН. Регулирование осуществляется путем изменения коэффициента трансформации. В зависимости от типа устройства РПН регулирование может осуществляться как со стороны низшего

напряжения (НН), так и высшего (ВН), а также иметь различную область регулирования. Значение напряжения может составлять как $\pm 8\%$, так и достигать $\pm 16\%$ в устройствах РПН с реверсивной схемой регулирования [1]. На рисунке 1 приведены примеры схем трансформаторов с различными типами регулировочных обмоток.

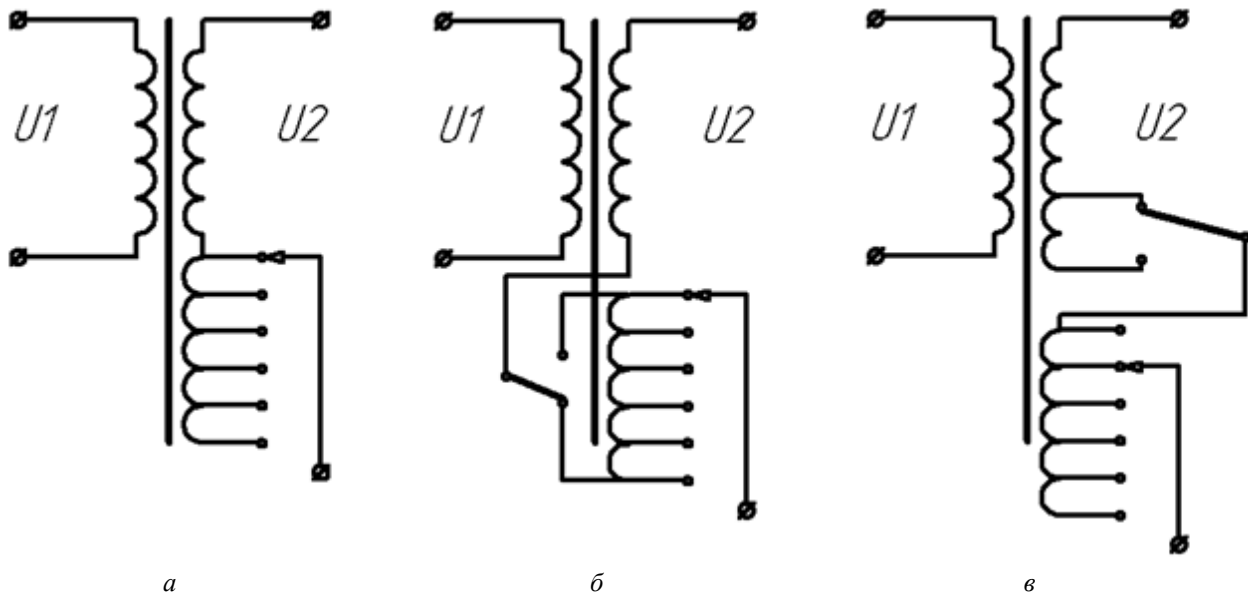


Рисунок 1 – Схемы регулировочных обмоток: без реверсирования (а); с реверсированием (б); со ступенью грубой регулировки (в)

Коэффициент трансформации изменяется путем переключения регулировочных обмоток (отпаек). Как правило, регулировочные ответвления выполняют со стороны ВН. Обусловлено это тем, что со стороны ВН протекают более низкие значения тока, что в свою очередь позволяет снизить износ РПН, однако существуют исключения. В качестве примера можно привести систему тягового электроснабжения 2×25 кВ. В данной системе применяются специализированные трансформаторы ОРДНЖ, в которых устройство регулирования установлено на стороне НН.

Устройства РПН автоматизируют процессы управления системой электроснабжения, что позволяет быстро реагировать на изменения в системе и повышает эффективность ее эксплуатации. Однако при работе РПН в режиме автоматического регулирования напряжения на сложных участках электроснабжения частые колебания нагрузки и регулярные изменения напряжения приводят к перегрузкам и, как следствие, к ускоренному износу элементов устройства [2]. На участках с высокой загруженностью известны случаи выставления повышенной ступени напряжения и отключения автоматики регулирования. Таким образом персонал тяговых подстанций стремится избежать повышенного износа переключающих устройств. Имеющиеся в настоящее время статистические данные по переключениям РПН не содержат информации по контролю состояния узлов данного оборудования.

В связи с этим контроль и прогнозирование износа устройств РПН в системах тягового электроснабжения является актуальной задачей.

Контроль износа РПН в настоящее время осуществляется путем наблюдения за числом переключений при помощи специального счетчика либо при помощи различных методов диагностики. Оба этих способа имеют недостатки: счетчик не позволяет наблюдать за текущим износом, а большинство других методов диагностики требуют вскрытия бака трансформатора. Счетчик числа переключений в настоящее время является основным способом контроля эксплуатационного износа устройства [3].

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

С целью прогнозирования электрического износа контактов устройств РПН было принято решение разработать модель счетчика числа переключений. Прогнозирование в системах тягового электроснабжения является трудной задачей из-за постоянно меняющихся графиков движения. Еще одной проблемой является то, что расчеты режимов работы систем тягового электроснабжения выполняются в статике без учета регулирования напряжения в трансформаторах. Однако динамическое моделирование, учитывающее возможные изменения напряжения, позволит спрогнозировать еще на стадии проектирования, как быстро произойдет износ устройства, и подобрать РПН соответствующего уровня надежности [4, 5].

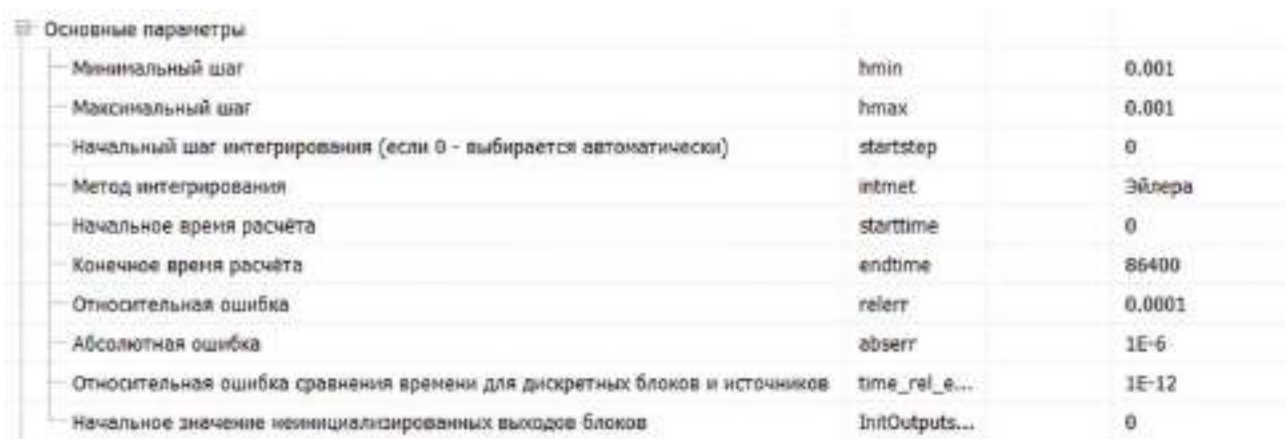
Для детального исследования и анализа нестационарных процессов был выбран программный комплекс SimInTech, позволяющий моделировать динамические системы, детализировать проработку в зависимости от конкретных задач, которые ставит пользователь [6, 7].

Модель системы тягового электроснабжения относится к разряду энергетических объектов. Для решения подобного рода задач в программном комплексе используется библиотека блоков «ЭЦ-Динамика». При разработке счетчика числа переключений использовались также иные вспомогательные блоки.

Комплекс SimInTech дает широкие возможности для настройки параметров расчета. Это позволяет тонко настраивать соотношение требуемой точности расчета и скорости. Программный комплекс для решения разного рода задач предлагает 16 методов интегрирования.

Для моделирования системы тягового электроснабжения был выбран метод Эйлера. Данный метод имеет фиксированный шаг интегрирования, что позволяет решать задачи «жесткого» типа, к которым относится система тягового электроснабжения, с высокой точностью. Недостатком данного метода является невысокая скорость расчета.

Основные параметры расчета, принятые для моделирования системы, приведены на рисунке 2.



Параметр	Имя параметра	Значение	Метод
Минимальный шаг	hmin	0.001	
Максимальный шаг	hmax	0.001	
Начальный шаг интегрирования (если 0 - выбирается автоматически)	startstep	0	
Метод интегрирования	intmet	Эйлера	
Начальное время расчёта	starttime	0	
Конечное время расчёта	endtime	86400	
Относительная ошибка	relerr	0.0001	
Абсолютная ошибка	abserr	1E-6	
Относительная ошибка сравнения времени для дискретных блоков и источников	time_rel_e...	1E-12	
Начальное значение инициализированных выходов блоков	InitOutputs...	0	

Рисунок 2 – Заданные параметры расчета

За основу схемы исполнения модели было решено взять систему тягового электроснабжения 2×25 кВ. Основные элементы данной системы:

- тяговые трансформаторы марки ОРДНЖ с расщепленной вторичной обмоткой и встроенным устройством РПН со стороны обмотки НН;
- ЛЭП 110 или 220 кВ;
- автотрансформаторы марки АОМЖ;
- провода контактной подвески и питающих линий;
- рельсы;
- нагрузка, представляющая собой подвижной тяговый состав.

Ниже приведены технические данные, учитываемые при моделировании, которые были взяты из паспортов устройств.

Технические данные трансформатора ОРДНЖ-25000/110/27,5:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Номинальная мощность – 25000 кВ·А;

Номинальное значение обмотки ВН – 115 кВ;

Номинальное значение обмотки НН – 27,5 – 27,5 кВ;

Ток х.х – 0,6 %;

Напряжение к.з – ВН – НН – 11,5 %; НН– НН – 24,0 %.

Технические данные автотрансформатора АОМЖ-10000/2×27,5:

Номинальная мощность – 10000 кВ·А;

Номинальное значение обмотки ВН – 27,5×27,5 кВ;

Номинальное значение обмотки НН – 27,5 кВ;

Ток х.х – 0,5 %;

Напряжение к.з – 2 %.

Контактный провод МФ-85: сопротивление 1 км – 0,208 Ом.

Помимо системы электроснабжения необходимо смоделировать схему регулирования напряжения, которая включает в себя показатель текущей ступени регулирования и счетчик числа переключений. Функциональная схема модуля анализа и автоматического регулирования напряжения приведена на рисунке 3.

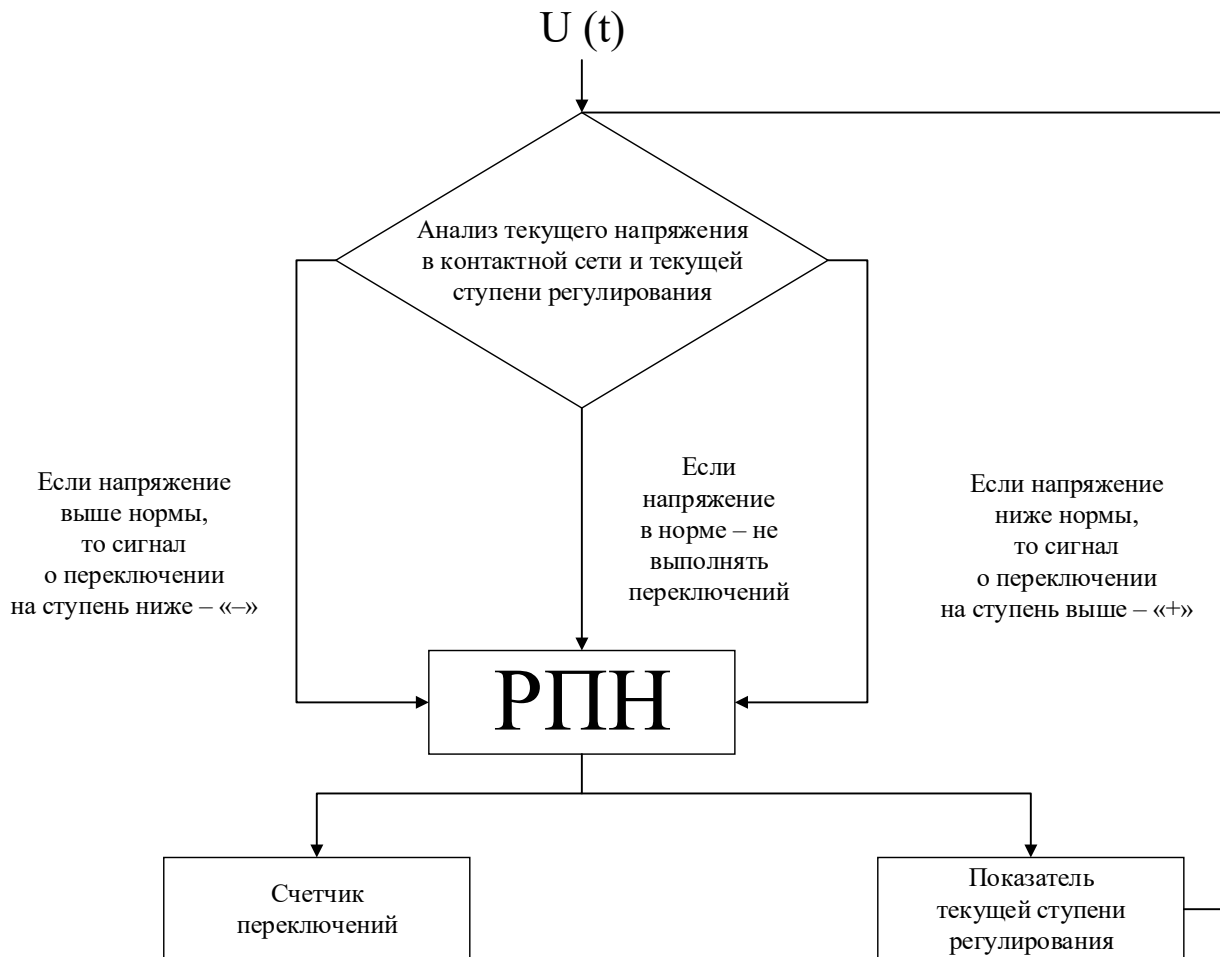


Рисунок 3 – Функциональная схема работы автоматического регулирования напряжения

В рабочем окне программы SimInTech была построена принципиальная схема, включающая в себя частичную модель системы тягового электроснабжения; активно-индуктивную

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

нагрузку, изменяющуюся во времени случайным образом по закону Гаусса; модель автоматического регулирования напряжения, включающую в себя счетчик числа переключений. Система электроснабжения моделируется частично с целью упрощения расчетов, при необходимости ее можно значительно усовершенствовать [8, 9]. Автоматическое регулирование напряжения осуществляется по закону управления по отклонению.

Принято считать, что электрические параметры тяговой сети являются случайными величинами и подчиняются гауссовскому распределению. Также установлено, что не существует универсального метода распределения графиков электрической нагрузки с помощью теоретических законов. Именно поэтому для проверки работоспособности модели было решено задать нагрузку случайного характера по закону Гаусса.

Принципиальная схема модели приведена на рисунке 4.

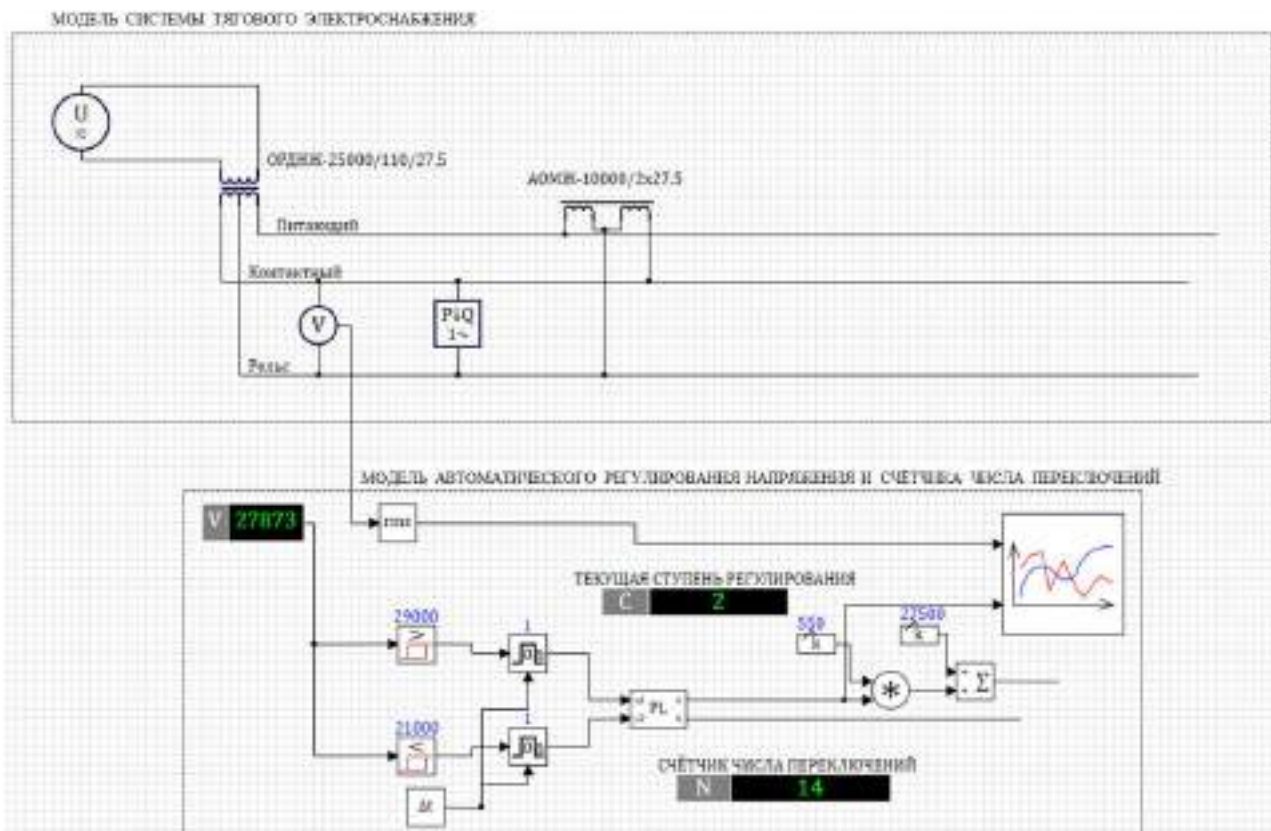


Рисунок 4 – Рабочее окно модели в программном комплексе SimInTech

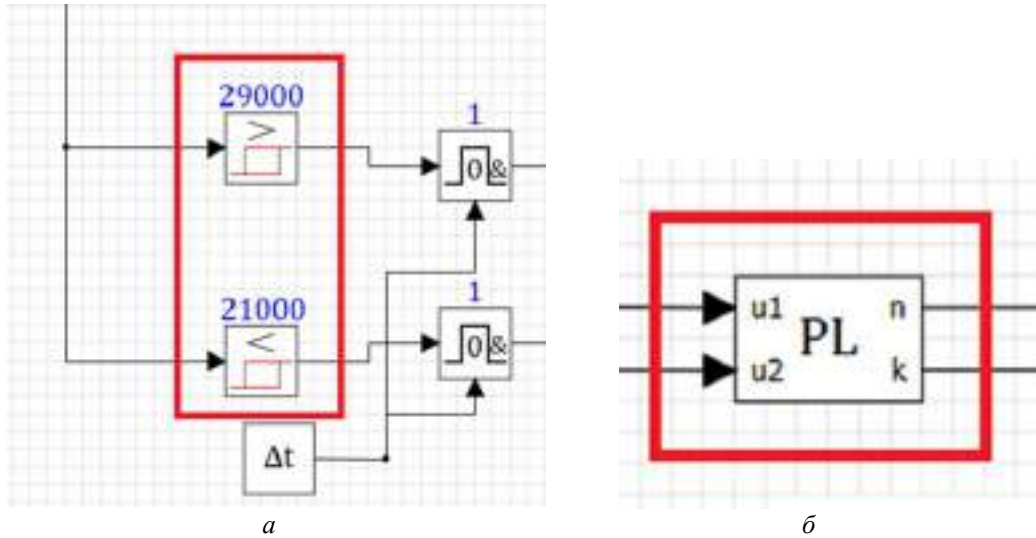
Согласно требуемым стандартам уровней напряжения среднее трехминутное значение напряжения на фидере не должно превышать 29 000 В и опускаться ниже 21 000 В [10]. Данные уставки задаются при помощи блоков верхней и нижней уставок (рисунок 5, а). Далее следуют блоки единичных сигналов, посылающих импульсы при срабатывании заданной уставки на блок языка программирования, выделенного на рисунке 5, б. Данный блок выполняет несколько функций:

- 1) контроль текущей ступени регулирования;
- 2) переключение на пониженную или повышенную ступень регулирования или отклонение команды переключения в случае достижения крайней ступени;
- 3) внесение параметра текущей ступени регулирования в блок тягового трансформатора;
- 4) функция счетчика числа переключений.

Код программы, задающий поведение данного блока, показан на рисунке 5, в.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Для проверки правильности работы программы было решено провести серию расчетов при различных изменениях нагрузки. Проверка проводилась по специальному графику, отображающему ступень регулирования и напряжение. В начальный момент расчета ступень регулирования РПН выставлена на позицию «1». Конечное время расчета выставлялось 24 часа. На рисунке 6 показан график напряжения и указано количество переключений, выполненных за расчетный период.



```
1 input U1,U2;  
- var N,K = 0;  
- if (U1 = 1) and (N > -8) then  
- begin  
- N = N - 1  
- K = K + 1  
- end;  
- if (U2 = 1) and (N < 8) then  
- begin  
10 N = N + 1  
- K = K + 1  
- end;  
- output N;  
- output K;
```

б

Рисунок 5 – Элементы полученной модели

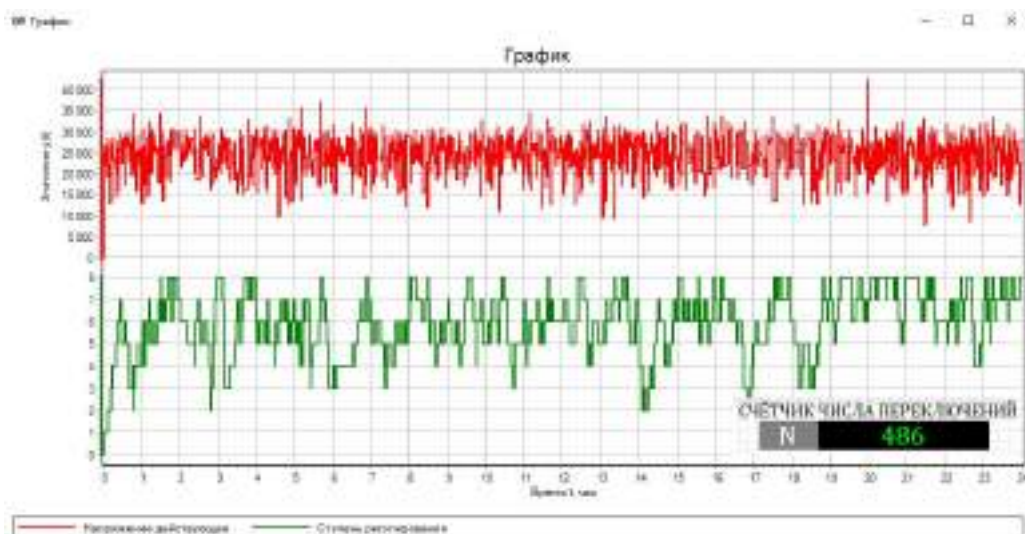


Рисунок 6 – График переключений за сутки

Важно отметить, что целью данных расчетов была проверка правильности работы модели системы автоматического регулирования напряжения и счетчика числа переключений для дальнейшей отладки программы. Специально для этой цели были заданы частые изменения и большой разброс мощности нагрузки, что обуславливает чрезмерно большое количество переключений в сутки.

На рисунке 7 показаны моменты переключений как на повышение ступени регулирования (слева), так и на понижение (справа).

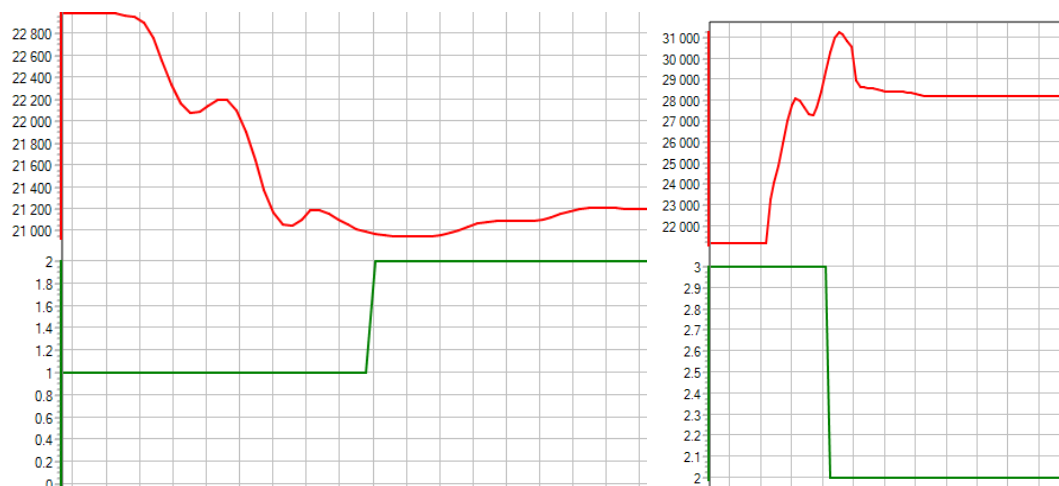


Рисунок 7 – Моменты переключений

Как мы видим, автоматическое регулирование работает корректно – переключения происходят в момент выхода за пределы допустимых параметров напряжения на фидере контактной сети. Отсутствие переключений на отрицательные ступени регулирования обусловлено отсутствием компенсирующих устройств (КУ и УПК) и систем рекуперации. Подсчет числа переключений также ведется верно – количество переключений на графиках соответствует показаниям индикатора числа переключений.

В процессе исследования была разработана программа, моделирующая автоматическое регулирование напряжения и ведущая подсчет числа переключений устройства регулирования под нагрузкой. Проведя дополнительные улучшения программы, компьютерная модель позволит прогнозировать износ устройств РПН на различных участках электроснабжения. Это также поможет изучать зависимости эксплуатационного износа устройств РПН от различных факторов, влияющих на него. К таковым могут относиться:

- 1) профиль пути;
- 2) интенсивность движения;
- 3) средний вес поездов;
- 4) дополнительное электротехническое оборудование, установленное с целью усиления системы тягового электроснабжения (УПК, КУ, автотрансформаторы и т.п.) [11, 12].

Планируются дальнейшее улучшение данной модели, загрузка графиков движения поездов и проработка различных факторов, влияющих на изменение напряжения, что позволит прогнозировать износ устройств РПН в системах тягового электроснабжения наиболее точно. На данном этапе разработки выявлен недостаток, который планируется устранить в ближайшее время – длительные расчеты занимают большой объем времени. Недостаток планируется устранить путем применения другого, «адаптивного» метода интегрирования. Адаптивный метод интегрирования позволяет оптимизировать вычислительные мощности ЭВМ, что в свою очередь ускорит расчет модели. Однако данный метод требует предварительной апробации.

1. Пышкин, А. А. Электроснабжение железных дорог / А. А. Пышкин, Д. В. Лесников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2023. – 507 с. – Текст : непосредственный.
2. Туйгунова, А. Г. Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД / А. Г. Туйгунова, И. А. Худоногов. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : труды межвузовской научно-практической конференции, Красноярск, 7 ноября 2017 г. / Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения. – Красноярск, 2017. – С. 7–12. – EDN YWSMQX.
3. Малафеев, А. В. Подход к учету коммутационного ресурса РПН при выборе оптимальных положений переключателей в процессе суточного регулирования напряжения на понизительных подстанциях промышленных предприятий / А. В. Малафеев, Ю. С. Иманова. – Текст : непосредственный // Электротехнические комплексы и системы : материалы международной научно-практической конференции, Уфа, 24 октября 2018 г. / Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа, 2018. – С. 255–258. – EDN VYWTLK.
4. Ананичева, С. С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2012. – 93 с. – Текст : непосредственный.
5. Комяков, А. А. Имитационное моделирование динамических процессов в системе тягового электроснабжения / А. А. Комяков, А. И. Шкулов, Л. А. Бартель. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 16–29. – EDN CDVXNI.
6. Савчук, И. В. Функциональные возможности программного комплекса SIMINTECH в реализации режимов моделирования, оптимизации, управления и контроля объектов / И. В. Савчук, В. Д. Белова. – Текст : непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 206–210. – EDN LMUWGI.
7. Пиляев, В. С. Моделирование в программном комплексе SIMINTECH коротких замыканий в системах сельскохозяйственного электроснабжения / В. С. Пиляев, С. Н. Пиляев. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, 10–11 ноября 2022 года / Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – Воронеж, 2022. – С. 293–299. – EDN PANIQI.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615172 Российская Федерация. Имитационная динамическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ : № 2018612326 : заявлено 12.03.2018 : опубликовано 27.04.2018 / Ушаков В. А., Черепанов А. В., Куцый А. П.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС). – EDN LBEORJ.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618070 Российская Федерация. Программа для моделирования графиков электрических нагрузок : № 2022616503 : заявлено 11.04.2022 : опубликовано 28.04.2022 / Крюков А. В., Куцый А. П.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». – EDN IHILI.
10. ГОСТ 29322–2014. Напряжения стандартные. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 13 с. – Текст : непосредственный.

11. Галков, А. А. Применение технологии «виртуальной сцепки» при усилении системы тягового электроснабжения на участке Зима – Иркутск сортировочный / А. А. Галков, И. А. Худоногов. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора М. Ф. Карасева и 80-летию со дня образования кафедры «Электрические машины и общая электротехника», Омск, 05–06 декабря 2023 г. / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 215–220. – EDN KRMDFK.

12. Кузнецов, К. Е. Разработка предложений по техническому перевооружению системы электроснабжения участка НЖ-ЗМ Восточного полигона / К. Е. Кузнецов, Д. В. Сальникова, А. П. Куцый. – Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2023. – № 2 (20). – С. 132–141. – EDN MVDPBV.

References

1. Pyshkin A.A., Lesnikov D.V. *Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog* [Power supply of railways]. Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2023. 507 p. ISBN 978-5-94614-530-5. (In Russian).

2. Tuygunova A.G., Khudonogov I.A. [Application of monitoring systems on power transformers of traction substations of the East Siberian Railway]. *Innovacionnyye tehnologii na zheleznodorozhnom transporte : trudy XXI mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii KRIZhT IrGUPS, 7 noiabria 2017 goda* [Innovative technologies in railway transport: Proceedings of the XXI Interuniversity scientific and practical conference KRIZhT IrGUPS, Krasnoyarsk, November 7, 2017]. Krasnoyarsk, 2017, pp. 7-12. EDN YWSMQX. (In Russian).

3. Malafeev A.V., Imanova Y.S. [Approach to the switching resource accounting of oltc when choosing the optimal positions of switches in the 24-hour voltage regulation process on the step-down substations of industrial works]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Ufa, 24 oktiabria 2018 goda* [Electrotechnical complexes and systems : proceedings of the international scientific and practical conference, Ufa, October 24, 2018]. Ufa, 2018, pp. 255-258. EDN VYWTLK. (In Russian).

4. Ananicheva S.S., Alekseev A.A., Myzin A.L. *Kachestvo elektroenergii. Regulirovanie napriazheniia i chastoty v energosistemakh* [The quality of electricity. Regulation of voltage and frequency in power systems]. Ekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Publ., 2012, 93 p. (In Russian).

5. Komyakov A.A., Shkulov A.I., Bartel L.A. Simulation modeling of dynamic processes in the traction power supply system. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2023, no. 2 (54), pp. 16-29. EDN CDVXNI. (In Russian).

6. Savchuk I.V., Belova V.D. Functional capabilities of the simintech software package in the implementation of modeling, optimization, control and control modes of objects. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia – Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2023, no. 7, pp. 206-210. EDN LMUWGI. (In Russian).

7. Pilyaev V.S., Pilyaev S.N. [Simulation in the SIMINTECH software package of short circuits in agricultural power supply systems]. *Innovatsionnyye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlia APK : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov, posviashchennoi 110-letiiu FGBOU VO «Voronezhskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni imperatora Petra I», Voronezh, 10–11 noiabria 2022 goda* [Innovative technologies and technical means for Agriculture : proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists dedicated to the 110th anniversary of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, Voronezh, November 10-11, 2022]. Voronezh, 2022, pp. 293-299. EDN PANIQI. (In Russian).

8. Ushakov V.A., Cherepanov A.V., Kutsy A.P. *Certificate of state registration of computer program No. 2018615172 Russian Federation*, 27.04.2018.
9. Kryukov A.V., Kutsy A.P. *Certificate of state registration of computer program No. 2022618070 Russian Federation*, 28.04.2022.
10. GOST 29322 – 2014. Standard voltages. Moscow, Standardinform Publ., 2015. 13 p. (In Russian).
11. Galkov A.A., Khudonogov I.A. [Application of the "virtual coupling" technology for improvement the traction power supply system in the Zima - Irkutsk sorting section]. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii v promyshlennosti i na transporte : materialy X vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 120-letiiu so dnia rozhdeniia zasluzhennogo deiatelia nauki i tekhniki RSFSR, d.t.n., professora M.F. Karaseva i 80-letiiu so dnia obrazovaniia kafedry «Elektricheskie mashiny i obshchaia elektrotekhnika», Omsk, 05–06 dekabria 2023 goda* [Improving the efficiency of electromechanical energy converters in industry and transport : proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical conference with international participation, dedicated to the 120th anniversary of the birth of the Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor M.F. Karasev and the 80th anniversary of the establishment of the Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering, Omsk, 05-06 December 2023]. Omsk, 2023, pp. 215-220. EDN KRMDFK. (In Russian).
12. Kuznetsov K.E., Salnikova D.V., Kutsyi A.P. Development of proposals for the technical re-equipment of the power supply system of the NZH-ZM section of the Eastern landfill. *Molodaia nauka Sibiri – Young science of Siberia*, 2023, no. 2 (20), pp. 132-141. EDN MVDPBB. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галков Александр Андреевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7 (964) 350-90-33.

E-mail: galkov16@gmail.com

Худоногов Игорь Анатольевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского ул., д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта», ИрГУПС.

Тел.: +7 (964) 273-47-79.

E-mail: Hudonogovi@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Галков, А. А. Моделирование устройства регулирования напряжения под нагрузкой для системы тягового электроснабжения 2×25 кВ /А. А. Галков, И. А. Худоногов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 2 – 11.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galkov Aleksander Andreevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department "Electric Power Engineering of Transport", ISTU.

Phone: +7 (964) 350-90-33.

E-mail: galkov16@gmail.com

Khudonogov Igor Anatolyevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Sciences in Engineering, professor, professor of the department "Electric Power Engineering of Transport", ISTU.

Phone: +7 (964) 273-47-79.

E-mail: Hudonogovi@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Galkov A.A., Khudonogov I.A. Modeling of switching counter for on-load tap changer device for the traction power supply system 2×25 kV. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 2-11. (In Russian).

М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, И. Л. Саля

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ С КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески, что является актуальной задачей при разработке и оптимизации систем токосъема.

Предметом статьи является модель контактной подвески. Наибольшее распространение получили конечноэлементные модели и модели с сосредоточенными параметрами. Отмечены их ключевые особенности: конечноэлементные модели обладают высокой точностью, но требуют значительных вычислительных ресурсов, в то время как модели с сосредоточенными параметрами позволяют быстро оценивать взаимодействие, но имеют ограничения, связанные с упрощенным описанием физических процессов. Цель статьи – повышение достоверности моделирования взаимодействия токоприемников и контактной подвески при использовании моделей с сосредоточенными параметрами.

В рамках исследования предложена усовершенствованная модель контактной подвески, в которой приведенная масса заменяется инертором, что позволяет устранить проблему вынужденных колебаний и повысить точность моделирования динамики системы. Данная модель реализована в среде MATLAB Simulink, а ее валидность подтверждена корреляционным анализом, демонстрирующим лучшее соответствие расчетных данных с экспериментальными результатами по сравнению с существующими моделями.

Полученные результаты показывают, что предложенный подход позволяет повысить точность моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески в моделях с сосредоточенными параметрами, что делает его перспективным для применения при проектировании и оптимизации систем токосъема на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: контактная подвеска, токоприемник, модель с приведенными массами, инертор, контактное нажатие, функция отжатия.

Mikhail S. Mikhailov, Oleg A. Sidorov, Ilya L. Salya

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

PANTOGRAPH AND CATENARY INTERACTION MATHEMATICAL MODEL IMPROVEMENT

Abstract. The article explores the modeling of the interaction between the pantograph and the catenary, which is a relevant task in the development and optimization of current collection systems.

The subject of the article is the modeling of the catenary, with finite element models and lumped parameter models being the most widely used approaches. Their key characteristics are highlighted: finite element models offer high accuracy but require significant computational resources, whereas lumped parameter models allow for a quicker assessment of interactions but have limitations due to their simplified representation of physical processes. The aim of this study is to improve the accuracy of modeling the interaction between pantographs and the catenary using lumped parameter models.

As part of the research, an improved catenary model is proposed, in which the lumped mass is replaced with an inerter. This modification eliminates the issue of forced oscillations and enhances the accuracy of system dynamics modeling. The proposed model is implemented in MATLAB Simulink, and its validity is confirmed through correlation analysis, demonstrating better agreement between the calculated and experimental data compared to existing models.

The obtained results show that the proposed approach allows for a more accurate simulation of the interaction between the pantograph and the catenary, making it a promising solution for use in the design and optimization of current collection systems in railway transport.

Keywords: catenary, pantograph, lumped mass model, inerter, contact force, contact wire uplift.

Моделирование взаимодействия токоприемника и контактной подвески представляет собой актуальную задачу при разработке систем токосъема, поскольку определение их параметров невозможно без анализа их взаимодействия. В связи с этим особое внимание уделяется созданию и совершенствованию математических моделей процесса токосъема.

Наибольшее распространение получили модели с приведенными массами, позволяющие с достаточной точностью анализировать взаимодействие токоприемника с контактной подвеской в прикладных задачах. Однако такие модели не позволяют проводить детальный механический анализ конструкции токоприемника, так как не дают возможности оценить силы, возникающие в отдельных элементах конструкции [1].

Как правило, данные модели являются одномерными, где число степеней свободы соответствует количеству приведенных масс, определяемому необходимым уровнем детализации и конструктивными особенностями токоприемника. Приведенные массы соединяются посредством упругих, демпфирующих и иных элементов, имитирующих реальные процессы в токоприемнике. Параметры таких моделей определяются экспериментально или с помощью специализированных методов моделирования.

Исследования показали, что упругая деформация верхнего рычага токоприемника оказывает заметное влияние на процесс токосъема, вызывая высокочастотные колебания относительно нижнего рычага. Для учета этого эффекта используются трехмассовые модели, в которых масса рам разделена на две части: одну, соответствующую нижней раме, и другую – верхней. Между ними вводится упругий элемент, учитывающий изгибную жесткость верхней рамы. Такие трехмассовые модели широко применяются для исследования взаимодействия токоприемников и контактных подвесок [2].

Несмотря на то, что модели с приведенными массами не способны учесть все процессы, происходящие в токоприемнике, они позволяют быстро и достаточно точно оценить его поведение в процессе токосъема. Поэтому эти модели широко применяются для анализа и оценки технических решений.

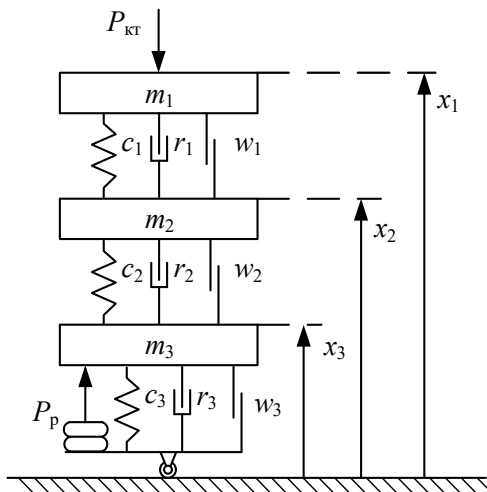


Рисунок 1 – Обобщенная расчетная схема трехмассовой модели токоприемника

На рисунке 1 приведена обобщенная расчетная схема трехмассовой модели токоприемника, на которой приняты следующие обозначения: x_1 – высотное положение верхнего узла токоприемника; x_2 – высотное положение верхней рамы; x_3 – высотное положение нижней рамы; 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 – коэффициент вязкого трения в каретке; r_2 – коэффициент вязкого трения в верхней раме; r_3 – коэффициент вязкого трения в нижней раме; w_1 – сила нелинейного сухого трения в каретке; w_2 – сила нелинейного сухого трения в верхней раме; w_3 – сила нелинейного сухого трения в

нижней раме; P_p – сила, создаваемая подъемным пневмоэлементом токоприемника; $P_{кТ}$ – контактное нажатие токоприемника. И в зависимости от типа токоприемника, особенностей методов решения и других причин из данных моделей могут исключаться дополнительные элементы или, наоборот, включаться в них.

Система дифференциальных уравнений второго порядка, полученная в соответствии с уравнениями Лагранжа второго рода, имеет следующий вид [3]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) + r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - P_{кТ}; \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_1(x_1 - x_2) + c_2(x_2 - x_3) - r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_2(x_2 - x_3) + c_3 x_3 - r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + r_3 \dot{x}_3 = w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3) + P_p. \end{cases} \quad (1)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Моделирование контактной подвески также является актуальной задачей при исследовании работы системы токосяема. Наибольшее распространение в настоящее время получили конечноэлементные модели контактной сети. В таких моделях контактная подвеска делится на достаточно малые связанные между собой фрагменты – конечные элементы. Они позволяют получить наиболее полную информацию о процессах, происходящих в контактной подвеске при ее взаимодействии с токоприемником. Однако ввиду высокой детализации для их программной реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и время, из-за чего их применение затруднительно для исследования процесса токосяема при выборе рациональных параметров токоприемников на этапе их разработки [4, 5].

Более простыми являются модели подвесок с сосредоточенными параметрами, где контактная подвеска представляется в виде одномерного колебательного контура [6, 7]. Хотя данные модели содержат большое число допущений и не позволяют учитывать волновые процессы, происходящие в контактной подвеске, их применение целесообразно при разработке токоприемников, поскольку такие модели не требуют значительных затрат вычислительных мощностей, что позволяет оперативно подбирать рациональные параметры токоприемников на этапе их разработки.

При использовании моделей с приведенными массами (рисунок 2, а) контактная подвеска обычно представляется в виде перемещаемой по обобщенной координате (x_k) и приведенной к точке контакта массы контактной подвески ($m_{пкс}$), которая посредством элементов упругости ($c_{пкс}$), вязкого ($r_{пкс}$) и сухого ($W_{пкс}$) трения соединена с точкой, изменяющей свое вертикальное положение во времени в соответствии с положением контактного провода в пролете ($x_{к0}(vt)$), где v – скорость движения ЭПС) при перемещении токоприемника вдоль контактной подвески в случае отсутствия воздействия на контактную подвеску со стороны токоприемника. При этом элементы вязкого ($r_{пкс}$) и сухого ($W_{пкс}$) трения могут соединяться как с точкой, соответствующей вертикальному положению контактного провода ($x_{к0}(vt)$), так и с неподвижной точкой, не перемещающейся с течением времени.

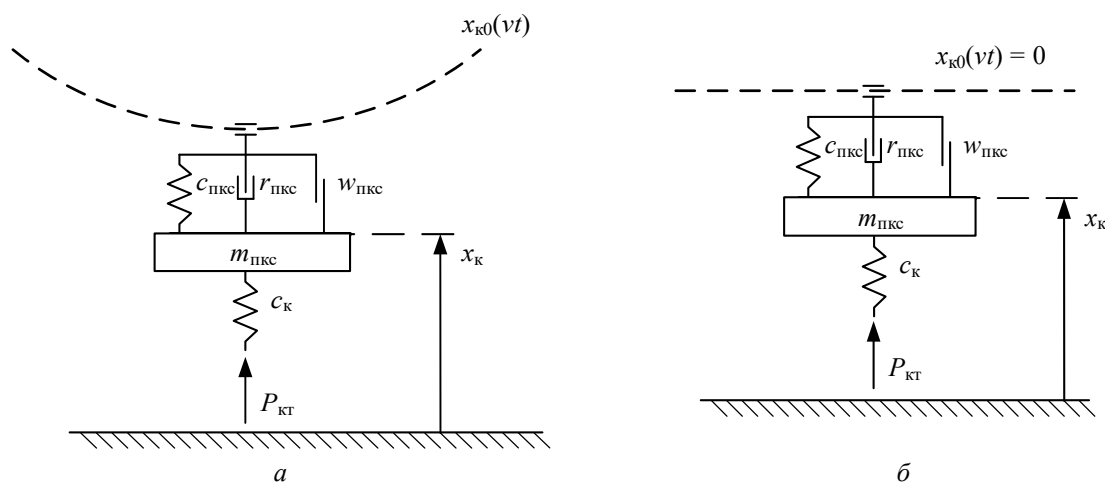


Рисунок 2 – Известные модели контактной подвески с сосредоточенными параметрами:
а – модель с вертикальными перемещениями контактного провода; б – модель с изменяющейся в пролете жесткостью контактной подвески

При моделировании взаимодействия токоприемников и контактной подвески для имитации контакта широко применен метод штрафных функций. Его суть заключается в оценке величины «зазора» между контактными элементами и контактным проводом:

$$\begin{cases} P_{кт} = c_к (x_{к.п} - x_3), & (x_{к.п} - x_3) \leq 0; \\ P_{кт} = 0, & (x_{к.п} - x_3) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $c_к$ – жесткость контакта;

$x_{к.п} - x_3$ – «зазор» между контактным проводом и ползком токоприемника.

Таким образом, в данной схеме контактная подвеска представляет собой колебательный контур, перемещающийся относительно обобщенной координаты x_k (см. рисунок 2, а). При вертикальных перемещениях точки ($x_{к0}(vt)$) возникают вынужденные колебания, изменяющие положение приведенной массы контактной подвески. Возникновение вынужденных колебаний обуславливается невозможностью мгновенного перемещения приведенной массы контактной подвески относительно приведенной координаты x_k , из-за чего вертикальное положение контактной подвески в пролете изменяется даже при отсутствии на нее воздействия со стороны токоприемника. Такое представление контактной подвески позволяет с достаточной степенью достоверности описывать взаимодействие контактной подвески и токоприемника при малых скоростях движения, но с ростом частоты вертикальных колебаний точки контакта при увеличении скорости движения подвижного состава влияние данного эффекта на результаты моделирования увеличивается.

Также широко используются модели контактной подвески, лишенные описанного недостатка, где положение вертикальное контактного провода принимается постоянным и не зависящим от положения токоприемника в пролете ($x_{к0}(vt) = 0$) (рисунок 2, б) [8, 9], однако в таких моделях стрела провеса контактного провода не учитывается. Такой подход обуславливается тем, что неравномерность жесткости (эластичности) в пролете в некоторых контактных подвесках вносит значительно большее влияние, чем изменение вертикального положения контактного пролета в пролете вследствие наличия стрелы провеса. Вертикальные перемещения полоза в таких моделях обуславливаются тем, что жесткость контактной подвески принимается в виде функции, зависящей от положения токоприемника в пролете. Такое представление является достаточно достоверным при моделировании обычных контактных подвесок, где наблюдается значительная неравномерность жесткости в пролете. Однако совершенствование контактных подвесок, а именно выравнивание жесткости контактной подвески в пролете, приводит к росту влияния стрел провеса на динамику взаимодействия, что требует учета обоих факторов: неравномерности жесткости и стрел провеса контактного провода. Для повышения точности моделирования такие модели могут совершенствоваться за счет получения дополнительной информации на основе конечно-элементных моделей контактной подвески [10].

Для снижения влияния указанного эффекта, связанного с возникновением вынужденных колебаний приведенной массы контактной подвески в исходной модели (см. рисунок 2, а), предлагается использовать инертор – элемент, создающий силу, пропорциональную некоторому коэффициенту b , который измеряется в килограммах, и разности ускорений между точками, между которыми размещается инертор [11]:

$$P_{и} = b \cdot (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2). \quad (3)$$

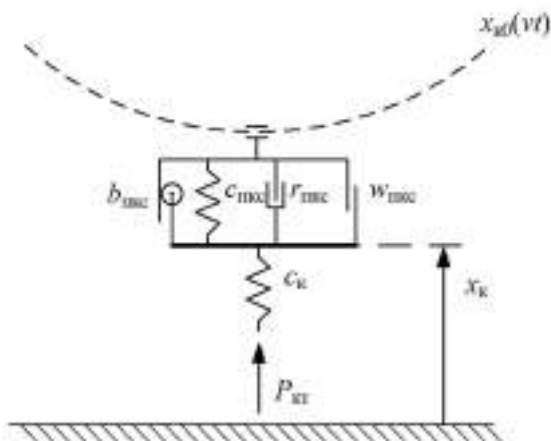


Рисунок 3 – Предлагаемая схема модели контактной подвески

Данный элемент является аналогом силы инерции, накапливающейся от кинетической энергии относительно некоторой точки, перемещаемой в пространстве. Это позволит более точно имитировать проведенную к точке контакта массу контактной подвески.

В предлагаемой расчетной схеме модели контактной подвески с приведенными массами (рисунок 3) приведенная масса контактной подвески заменяется на инертор, соединяющий точку $x_{к0}(vt)$, соответствующую вертикальному положению контактного провода при отсутствии воздействий на него со стороны токоприемника и точку контакта x_k . Коэффициент b принимается равным приведенной массе контактной подвески.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В соответствии со II законом Ньютона и принципом Даламбера равнодействующая сил в точке x_k :

$$b_{\text{пкс}} (\ddot{x}_{k0} - \ddot{x}_k) + c_{\text{пкс}} (x_{k0} - x_k) + r_{\text{пкс}} (\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) + w_{\text{пкс}} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) + P_{\text{кт}} = 0. \quad (4)$$

При моделировании принимаются следующие допущения:

амплитуда вертикальных колебаний является малой по сравнению с полным рабочим ходом токоприемника и подъемный резинокордный элемент соединен с дополнительным резервуаром бесконечно большого объема, что позволяет принять статическое нажатие токоприемника постоянным;

нижняя рама принята абсолютно жесткой;

параметры подвески приняты в соответствии с экспериментальными данными, полученными при исследовании контактной подвески КС-250-06: стрела провеса контактного провода принята равной 0,035 м; распределение жесткости в пролете на рисунке 4 (наличие резких перегибов в распределении жесткости не оказывает значительного влияния на процесс численного моделирования, поскольку при этом не возникает резких изменений накопленной упругими элементами энергии); высотное положение представлено на рисунке 5;

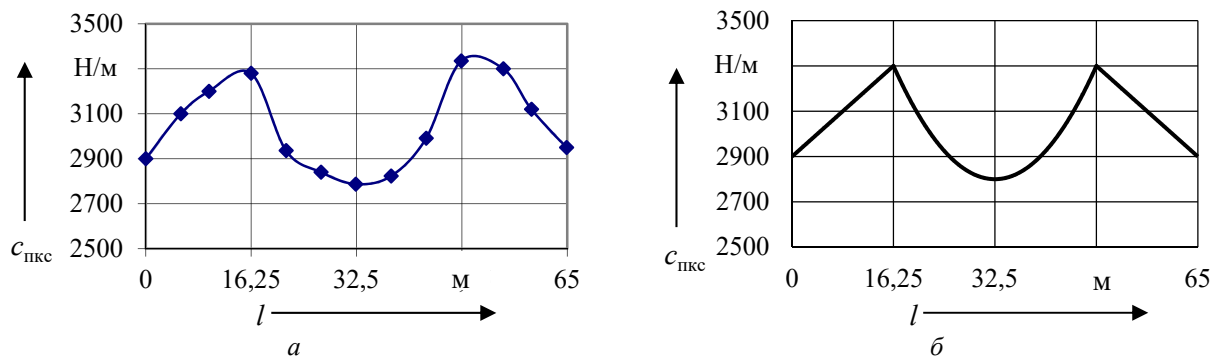


Рисунок 4 – Распределение жесткости контактной подвески в пролете: *a* – полученное экспериментально; *б* – принятое для использования в модели

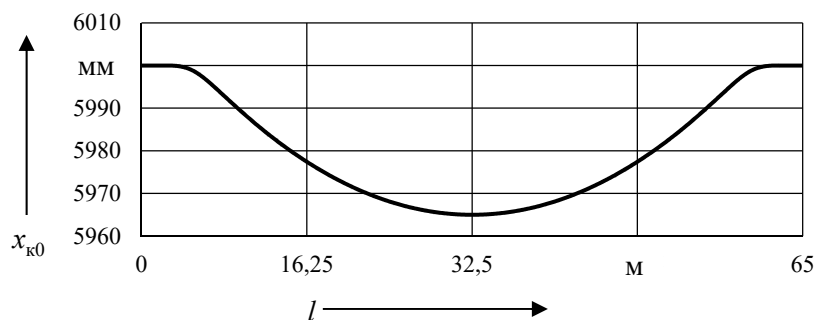


Рисунок 5 – Высотное положение контактного провода в пролете

влияние аэродинамической подъемной силы не учитывается, ее значение принимается равным нулю и не зависит от скорости;

токоприемник обладает абсолютной жесткостью в продольном и поперечном направлениях;

не учитывается вращательное движение полоза токоприемника;

не учитывается перераспределение контактного нажатия по ширине полоза токоприемника;

не учитываются вертикальные колебания кузова электроподвижного состава, поскольку колебания кузова современного электроподвижного состава малы по сравнению с изменением высотного положения контактного провода в пролете.

Нелинейные силы сухого трения в расчетах были линеаризованы следующей кусочно-постоянной функцией:

$$\begin{cases} \text{sign}(x_i - x_k) = -1, & x_i - x_k \leq -0,01; \\ \text{sign}(x_i - x_k) = 100 \cdot (x_i - x_k), & |x_i - x_k| < 0,01; \\ \text{sign}(x_i - x_k) = 1, & x_i - x_k > 0,01. \end{cases} \quad (5)$$

Для моделирования контактной подвески в среде *MATLAB Simulink* выражения должны быть сведены в одну систему и записаны в форме, необходимой для реализации в программном комплексе:

$$\begin{cases} \ddot{x}_k = \frac{b_{\text{пкс}} \cdot \ddot{x}_{k0} + c_{\text{пкс}} (x_{k0} - x_k) + r_{\text{пкс}} (\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) + w_{\text{пкс}} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) - c_k (\dot{x}_k - \dot{x}_3)}{b_{\text{пкс}}}; \\ \ddot{x}_1 = \frac{c_k (\dot{x}_k - \dot{x}_3) - c_1 (x_1 - x_2) - r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{m_1}; \\ \ddot{x}_2 = \frac{c_1 (x_1 - x_2) - c_2 (x_2 - x_3) + r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)}{m_2}; \\ \ddot{x}_3 = \frac{c_2 (x_2 - x_3) - c_3 x_3 + r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - r_3 \dot{x}_3 + w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3) + P_p}{m_3}. \end{cases} \quad (6)$$

Реализация в программном комплексе *MATLAB Simulink* предлагаемой математической модели, в которой приведенная масса контактной подвески представлена в виде инертора, приведена на рисунке 6.

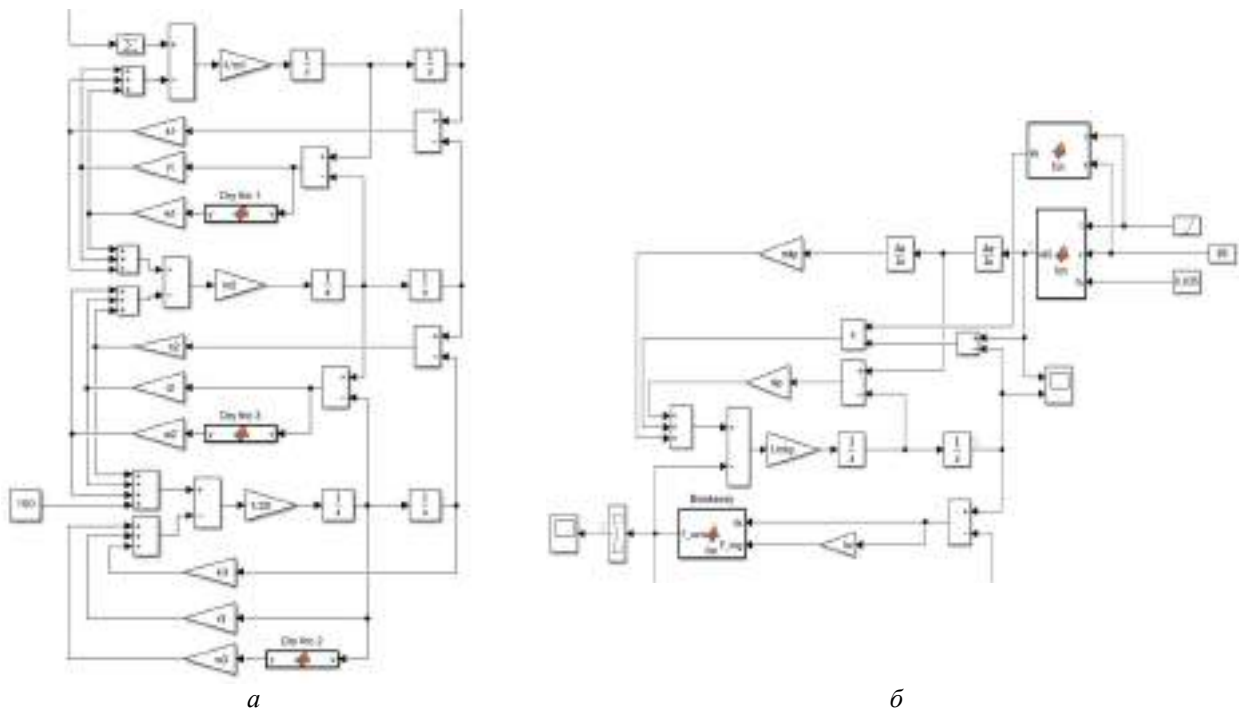


Рисунок 6 – Реализация математической модели в *MATLAB Simulink*:
а – модель токоприемника; б – модель контактной подвески

В *MATLAB Simulink* дифференциальные уравнения решаются графически с помощью блоков, представляющих математические операции. Уравнения, входящие в систему,

преобразуется в уравнения первого порядка, где производные выражаются через интеграторы, а остальные операции реализуются сумматорами, коэффициентами умножения, программными и другими блоками. Входные сигналы формируют динамику системы, а численное интегрирование выполняется встроенными методами. *Simulink* позволяет легко модифицировать модель, добавляя нелинейности, обратные связи и другие элементы, что делает его мощным инструментом для исследования динамических систем.

Запуск модели позволяет визуализировать решение с помощью осциллографов или передавать данные в рабочее пространство в виде электронных таблиц для дальнейшего анализа. После проведения моделирования результаты можно экспортировать в *MATLAB Workspace* для дальнейшего анализа с помощью скриптов, построения графиков и численных методов обработки данных.

Наиболее целесообразно для валидации модели взаимодействия токоприемника и контактной подвески использовать отжатие контактного провода, поскольку контактное нажатие в процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвески подвержено влиянию различных факторов, вносящих в кривые нажатия практически случайные шумы, которые сложно отфильтровать без потери полезной информации, тогда как в функции отжатия шумы сглаживаются за счет инертности полоза токоприемника и контактного провода.

На рисунке 7 приведены функция отжатия, полученная в результате испытаний реальной контактной подвески КС-200-06 при движении на скорости 200 км/ч, и кривые, полученные с использованием различных типов моделей. Кривые, полученные экспериментально, изображены сплошной линией, в результате моделирования – пунктирными линиями. Пролеты выделены вертикальными пунктирными линиями.

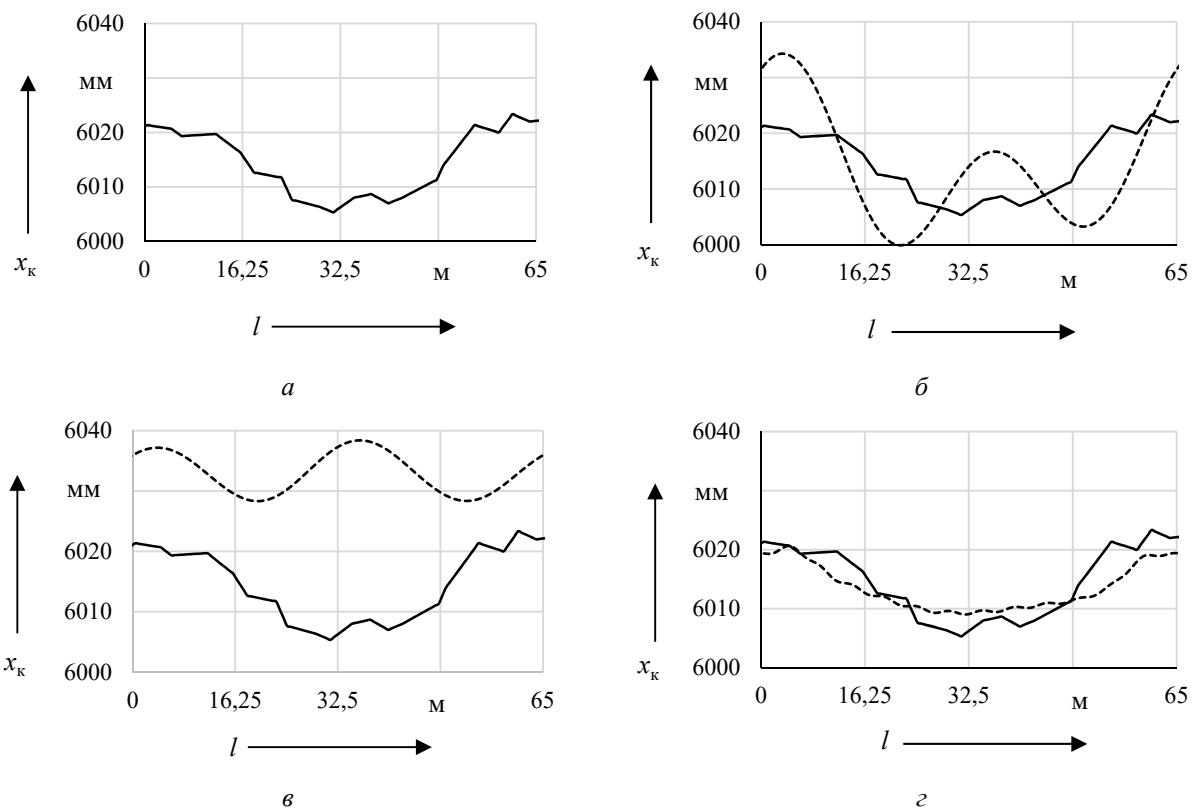


Рисунок 7 – Функция отжатия и положение контактного провода в пролете: а – экспериментальные данные; б – исходная модель; в – модель с изменяемой в пролете жесткостью; г – предлагаемая модель

Экспериментальная функция отжатия (рисунок 7, а) значительно отличается от пролета к пролету, что обусловлено различной длиной пролетов, стрелами провеса контактного провода

и распределением жесткости в пролетах реальной контактной подвески, поэтому для оценки точности и достоверности моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески рассматривается один пролет, который был взят в качестве исходного при описании параметров контактной подвески.

Для оценки достоверности известных и предложенной моделей были определены коэффициент корреляции Пирсона и среднеквадратическая ошибка (RMSE), для чего в анализируемом пролете было выделено 100 точек.

Коэффициент корреляции Пирсона определяет, насколько синхронно изменяются две кривые, и отражает только форму зависимости между графиками. Коэффициент находится в интервале от -1 до 1 (значения, близкие к 1 , указывают на совпадение форм графиков) и может быть вычислен по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

где x, y – массивы точек функций отжатия, полученных экспериментально и при моделировании, соответственно;

\bar{x}, \bar{y} – средние значения функций отжатия, полученных экспериментально и при моделировании, соответственно.

Среднеквадратическая ошибка определяет количественную разницу между значениями, предсказанными моделью, и фактическими значениями и имеет тот же масштаб, что и сравниваемые величины. Меньшее значение указывает на более точное совпадение кривой, полученной в результате моделирования, и кривой, полученной экспериментально. Среднеквадратическая ошибка рассчитывается по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad (8)$$

где n – число точек в массиве.

Таким образом, коэффициент корреляции Пирсона оценивает сходство тенденций функций отжатия, а среднеквадратическая ошибка – численное сходство.

При использовании исходной схемы моделирования контактной подвески (рисунок 7, б) функция отжатия хотя и повторяет траекторию провисания контактного провода, но в середине пролета наблюдается вертикальные колебания точки контакта, что обусловливается инерционными характеристиками приведенной массы контактной подвески. Коэффициент корреляции экспериментальной и расчетной функций отжатия составил $0,54$, среднеквадратическая ошибка – $8,6$ мм.

Модели, в которых учитывается только изменение жесткости в пролете (рисунок 7, в), не позволяют реалистично моделировать функцию отжатия при равномерной жесткости контактной подвески, которая достигается в современных контактных подвесках, что объясняется отсутствием имитации стрелы провеса контактного провода. Коэффициент корреляции функции отжатия такой модели составил 0 , среднеквадратическая ошибка – $20,2$ мм.

Предлагаемая модель контактной подвески позволяет получить наиболее достоверные данные о функции отжатия среди исследованных моделей. Таким образом, описание приведенной массы контактной подвески с использованием инертора позволяет более достоверно моделировать взаимодействие токоприемника и контактной подвески при использовании моделей с приведенными массами. Для предлагаемой модели коэффициент корреляции составил $0,91$, среднеквадратическая ошибка – $3,0$ мм.

На рисунке 8 представлены кривые огибающих минимального и максимального контактных нажатий, полученные различными методами представления контактной подвески.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

В моделях с жестким токопроводом, являющихся наиболее простым способом представления контактной подвески, резонанс, приводящий к возникновению отрывов, возникает при скорости 90 м/с, при этом на скорости 60 м/с наблюдается резонанс, связанный с работой кареток, который, однако, не приводит к отрывам.

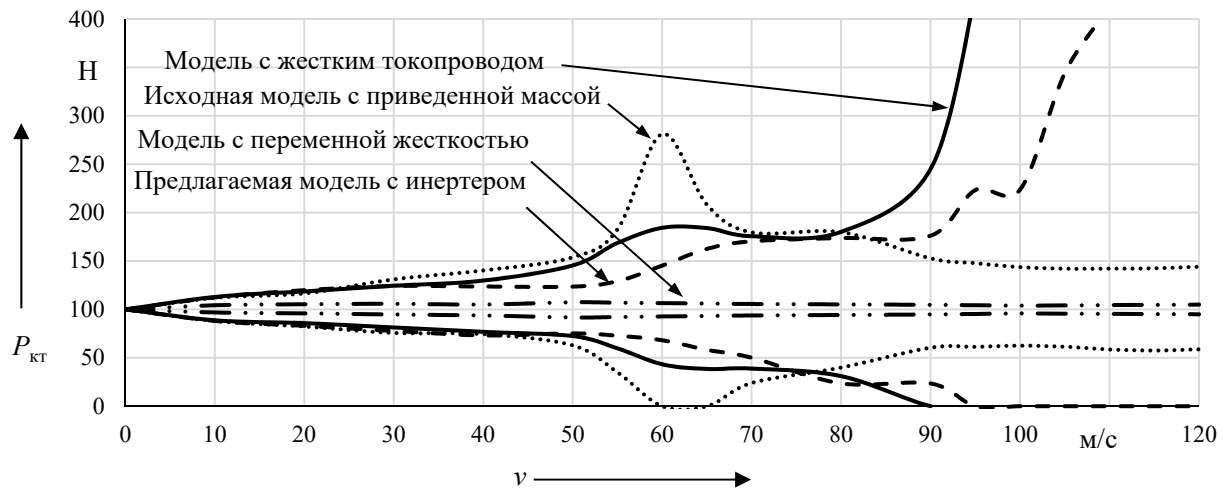


Рисунок 8 – Сравнение результатов расчетов контактного нажатия, полученных при использовании различных типов моделей с сосредоточенными параметрами контактной подвески

При моделировании с использованием исходной модели наблюдается разброс контактного нажатия – увеличивается при увеличении скорости до 60 м/с, на которой возникает резонанс, однако дальнейшее увеличение скорости движения приводит к уменьшению размаха колебаний, в результате чего размах контактного нажатия при скорости свыше 90 м/с устанавливается в пределах от 50 до 150 Н.

Применение моделей, в которых учитывается только неравномерность жесткости в пролете и игнорируется стрела провеса, не позволяет получить реалистичные данные о контактном нажатии в условиях применения контактных подвесок с низким коэффициентом неравномерности эластичности контактной подвески, из-за чего размах колебаний контактного нажатия не превышают 5 – 10 Н, что не является реалистичным.

В соответствии с предлагаемой моделью с инертором, имитирующим приведенную массу контактной подвески, скорость, на которой появляются отрывы, составляет 95 м/с и дальнейшее ее увеличение не приводит к выходу контактного нажатия из зоны отрывов, при этом резонанс на скорости 60 м/с отсутствует. Таким образом, математическая модель с сосредоточенными параметрами, в которой приведенная масса имитируется с помощью инертора, обеспечивает достаточную степень достоверности результатов при сравнении их с результатами, полученными в результате экспериментальных данных, полученных специалистами кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа при исследовании взаимодействия токоприемников и контактной подвески.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. В результате анализа существующих моделей контактной подвески с сосредоточенными параметрами установлено, что они не могут с достаточной степенью достоверности имитировать процессы взаимодействия токоприемника и контактной подвески из-за возникновения вынужденных колебаний массы, имитирующей приведенную массу контактной подвески.

2. Предложена модель контактной подвески с сосредоточенными параметрами, в которой ее приведенная масса представлена в виде инертора, что позволяет исключить появление вынужденных колебаний подвески и повысить точность моделирования.

3. Предложенная математическая модель контактной подвески с инертором была реализована в программной среде *MATLAB Simulink*. Полученные в результате моделирования

данные свидетельствуют о том, что данная модель позволяет получить наиболее достоверные результаты среди моделей с сосредоточенными параметрами, рассмотренными в статье (коэффициент корреляции функции отжатия составил 0,91 при среднеквадратичной ошибке 3,0 мм).

Список литературы

1. Wu, M., Xu, X., Zhang, H., Zhou, R., & Wang, J. (2024). Pantograph–Catenary Interaction Prediction Model Based on SCSA-RBF Network. *Applied Sciences*, 14(1), 449. DOI 10.3390/app14010449.
2. Rauter, F. G., Pombo, J., Ambrósio, J., Chalansonnet, J., Bobillot, A., & Pereira, M. S. (2007). Contact model for the pantograph-catenary interaction. *Journal of system design and dynamics*, 1(3), 447-457. DOI 10.1299/jsdd.1.447.
3. Система автоматического регулирования токоприемника, оснащенного внутрипружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. – № 1. – С. 75–81. – DOI 10.17213/0136-3360-2024-1-75-81. – EDN JMUUFZ.
4. Gregori, S., Tur, M., Nadal, E., & Fuenmayor, F. J. (2018). An approach to geometric optimisation of railway catenaries. *Vehicle System Dynamics*, 56(8), 1162-1186. DOI 10.1080/00423114.2017.1407434.
5. Bruni, S., Ambrosio, J., Carnicero, A., Cho, Y. H., Finner, L., Ikeda, M., ... & Zhang, W. (2015). The results of the pantograph–catenary interaction benchmark. *Vehicle System Dynamics*, 53(3), 412-435. DOI 10.1080/00423114.2014.953183.
6. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети / В. А. Вологин. – Текст : непосредственный // Труды Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТа). – Москва : Интекст, 2006. – 256 с.
7. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – Москва : Маршрут, 2003. – 416 с. – Текст : непосредственный. – EDN VNJOPH.
8. Abduraxman, B. M., Ward, C., Midgley, W., Harrison, T., & Goodall, R. (2021, August). Coupled models with contact kinematics for pantograph-catenary systems. In *The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks* (pp. 168-178). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-031-07305-2_18.
9. Spiroiu, M. A. (2024). Pantograph-Catenary Dynamics Simulation for High-Speed Trains. *Acta Technica Napocensis-series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 67(2s), pp. 779-786.
10. Duan, H., Dixon, R., & Stewart, E. (2023). A disturbance observer based lumped-mass catenary model for active pantograph design and validation. *Vehicle System Dynamics*, 61(6), 1565-1582. DOI 10.1080/00423114.2022.2085586.
11. Li, Y., Hu, N., Yang, Y., Cheng, Z., Yin, Z., Zhou, Z., & Hu, J. (2024). Physical realizations of inerter and inerter-based vibration control. *Heliyon*, 10(16). DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e35870.

References

1. Wu, M., Xu, X., Zhang, H., Zhou, R., & Wang, J. (2024). Pantograph–Catenary Interaction Prediction Model Based on SCSA-RBF Network. *Applied Sciences*, 14(1), 449. DOI 10.3390/app14010449.
2. Rauter, F. G., Pombo, J., Ambrósio, J., Chalansonnet, J., Bobillot, A., & Pereira, M. S. (2007). Contact model for the pantograph-catenary interaction. *Journal of system design and dynamics*, 1(3), 447-457. DOI 10.1299/jsdd.1.447.
3. Sidorov O.A., Smerdin A.N., Mikhailov M.S., Philippov V.M. Automatic control system of the pantograph, equipped with intraspring pneumatic elements in panhead suspension. *Izvestiya*

Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 75-81. DOI 10.17213/0136-3360-2024-1-75-81. EDN JMUUFZ. (In Russian).

4. Gregori, S., Tur, M., Nadal, E., & Fuenmayor, F. J. (2018). An approach to geometric optimisation of railway catenaries. *Vehicle System Dynamics*, 56(8), 1162-1186. DOI 10.1080/00423114.2017.1407434.

5. Bruni, S., Ambrosio, J., Carnicero, A., Cho, Y. H., Finner, L., Ikeda, M., ... & Zhang, W. (2015). The results of the pantograph–catenary interaction benchmark. *Vehicle System Dynamics*, 53(3), 412-435. DOI 10.1080/00423114.2014.953183.

6. Vologin V.A. *Vzaimodeistvie tokopriemnikov i kontaktnoi seti (Trudy Vserossiiskogo ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VNIIZhT))* [Interaction of pantographs and a contact network (Proceedings of the All-Russian Order of the Red Banner of Labor Scientific Research Institute of Railway Transport (VNIIZHT))]. Moscow, Intekst Publ., 2006, 256 p. ISBN 5-89277-071-0. (In Russian).

7. Miheev V.P. *Kontaktnye seti i linii elektroperedachi* [Contact lines and power transmission lines]. Moscow, Marshrut Publ., 2003, 416 p. ISBN 5-89035-086-2. EDN VNJOPH. (In Russian).

8. Abduraxman, B. M., Ward, C., Midgley, W., Harrison, T., & Goodall, R. (2021, August). Coupled models with contact kinematics for pantograph–catenary systems. In *The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks* (pp. 168-178). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-031-07305-2_18.

9. Spiroiu, M. A. (2024). Pantograph-Catenary Dynamics Simulation for High-Speed Trains. *Acta Technica Napocensis-series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 67(2s), pp. 779-786.

10. Duan, H., Dixon, R., & Stewart, E. (2023). A disturbance observer based lumped-mass catenary model for active pantograph design and validation. *Vehicle System Dynamics*, 61(6), 1565-1582. DOI 10.1080/00423114.2022.2085586.

11. Li, Y., Hu, N., Yang, Y., Cheng, Z., Yin, Z., Zhou, Z., & Hu, J. (2024). Physical realizations of inerter and inerter-based vibration control. *Heliyon*, 10(16). DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e35870.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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 (3812) 31-34-46.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

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

Саля Илья Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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 (3812) 31-34-46.

E-mail: mikhailovms54@gmail.com

Sidorov Oleg Asekseevich

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

Salya Ilya Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и компьютерная графика», ОмГУПС.

Тел.: +7 905-098-51-16.

E-mail: salyail@mail.ru

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Information science and computer graphics», OSTU.

Phone: +7 905-098-51-16.

E-mail: salyail@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михайлов, М. С. Совершенствование математической модели взаимодействия токоприемников с контактной подвеской / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, И. Л. Саля. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 12 – 23.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mikhailov M.S., Sidorov O.A., Salya I.L. Pantograph and catenary interaction mathematical model improvement. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 12-23. (In Russian).

УДК 621.336

О. А. Лукьянова, Ан. Н. Тарасов, И. Е. Чертков, А. В. Тарасенко

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

ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОЗА

Аннотация. При увеличении мощности современного электроподвижного состава, обеспечивающего грузо- и пассажироперевозки, остается актуальной проблема передачи больших тяговых токов, вызванная низкой нагрузочной способностью токоприемников, что может привести к перегреву и отжигу контактных вставок с последующим снижением их прочности, отслоением графита от медной оболочки, повышенным износом.

В статье рассмотрена классификация различных способов повышения нагрузочной способности токоприемников, наиболее перспективным из которых является охлаждение их полозов. К недостаткам известных активных и пассивных систем охлаждения полозов можно отнести необходимость применения для отведения тепла от нагретых частей дополнительных механизмов и узлов, которые эффективно работают только или при движении электроподвижного состава, или на стоянке.

Для устранения указанного недостатка авторами предложено техническое решение полоза токоприемника, оборудованного тепловыми трубками и способного успешно функционировать в различных режимах работы электроподвижного состава.

Для проверки работоспособности предложенного технического решения создана его математическая модель в программной среде SolidWorks, которая с помощью приложения FlowSimulation позволяет моделировать протекающие в полозе токоприемника тепловые процессы. При использовании тепловых трубок в конструкции полоза температура нагрева по его длине распределяется более равномерно, тем самым улучшая условия рассеивания тепла в окружающую среду, что позволит пропускать более высокие токи нагрузки.

Результаты математического моделирования тепловых процессов в полозе токоприемника в программной среде SolidWorks подтверждены экспериментальными исследованиями на специализированной установке.

Применение предложенного устройства способствует более равномерному распределению тепла по поверхности полоза, снижая нагрев контактных вставок и повышая нагрузочную способность токоприемника и надежность его работы в условиях скоростного, высокоскоростного и тяжеловесного движения поездов.

Ключевые слова: электроподвижной состав, токоприемник, полоз, контактная вставка, тепловая трубка, система охлаждения, нагрузочная способность, тепловой процесс, температура, нагрев, моделирование, термограмма.

Olesya A. Lukyanova, Andrey N. Tarasov, Ivan E. Chertkov, Alexander V. Tarasenko

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

INCREASING THE ELECTRIC ROLLING STOCK PANTOGRAPHS LOAD CAPACITY BY IMPROVING THE RUNNER COOLING SYSTEM

Abstract. With the increase in the capacity of modern electric rolling stock providing freight and passenger transportation, the problem of transmitting large traction currents remains relevant, caused by the low load capacity of

the pantograph, which can lead to overheating and annealing of the contact inserts with a subsequent decrease in their strength, peeling of graphite from the copper shell, and increased wear.

The article considers the classification of various methods for increasing the load capacity of pantographs, the most promising of which is cooling their runners. The disadvantages of the known active and passive runner cooling systems include the need to use additional mechanisms and units to remove heat from the heated parts, which work effectively only when the electric rolling stock is moving or at a standstill.

To eliminate this drawback, the authors proposed a technical solution for a pantograph runner equipped with heat pipes and capable of successfully operating in various operating modes of electric rolling stock.

To test the operability of the proposed technical solution, its mathematical model was created in the SolidWorks software environment, which, using the FlowSimulation application, allows modeling the thermal processes occurring in the pantograph runner. When using heat pipes in the runner design, the heating temperature is distributed more evenly along its length, thereby improving the conditions for heat dissipation into the environment, which will allow higher load currents to pass through.

The results of mathematical modeling of thermal processes in the pantograph runner in the SolidWorks software environment are confirmed by experimental studies on a specialized installation.

The use of the proposed device facilitates a more uniform distribution of heat over the surface of the runner, reducing the heating of the contact inserts and increasing the load capacity of the pantograph and the reliability of its operation under conditions of high-speed, high-speed and heavy-haul train movement.

Keywords: *electric rolling stock, pantograph, runner, contact insert, heat pipe, cooling system, load capacity, thermal process, temperature, heating, modeling, thermogram.*

Важнейшим направлением развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации является повышение пропускной и провозной способности железнодорожных участков, что требует, в свою очередь, применения новых технологий и технических решений, в том числе в части тягового электроподвижного состава [1]. Одним из ключевых факторов, влияющих на рост грузо- и пассажироперевозок, особенно при скоростном и высокоскоростном движении поездов, является передача электрической энергии на электроподвижной состав. Проблема обеспечения качественного токосъема тесно связана с увеличением мощности эксплуатируемого современного электроподвижного состава, что ведет к росту тяговых токов, снимаемых токоприемниками, а следовательно, к повышенным требованиям, предъявляемым к ним.

Токоприемники обеспечивают электрическую связь проводов контактной сети с электрическими цепями электроподвижного состава как во время движения, так и на стоянке, при этом в последнем случае имеется значительное ограничение по токовой нагрузке, вызванное локальным нагревом контактного провода.

К основным показателям токоприемников, определяющим допустимую скорость движения электроподвижного состава, можно отнести статическое нажатие на контактный провод, приведенную массу и др. В зависимости от приведенной массы токоприемники делятся на два типа: легкие (Л) – с допустимым длительным током в движении до 1200 А, которые применяются на грузовых и пассажирских электровозах переменного тока, электропоездах переменного и постоянного тока; тяжелые (Т) – с допустимым длительным током в движении свыше 1200 А, используемые на грузовых и пассажирских электровозах постоянного тока и двойного питания [2]. Кроме того, на допустимую скорость движения электроподвижного состава влияет большое количество внешних и внутренних факторов, связанных с конструкцией токоприемника, параметрами контактной подвески, колебаниями кузова подвижного состава, условиями окружающей среды, в том числе ветровыми и температурными воздействиями.

Повреждения токоприемников электроподвижного состава можно разделить на три категории: повреждения из-за неисправностей элементов и узлов контактной подвески (разрегулировка, обрывы проводов, технологические дефекты, неправильное техническое обслуживание и др.); повреждения из-за неисправностей элементов и узлов токоприемников (заклинивание, разрегулировка, изменение характеристик и др.); повреждения, вызванные внешними факторами (сход подвижного состава с рельсов, работа подъемных механизмов и др.). Возникновение повреждений токоприемников и контактной подвески различной степени

сложности приводит к задержкам в движении поездов и материальным затратам на их устранение [3, 4].

Для обеспечения сохранности токоприемников при эксплуатации и повышения их работоспособности необходимо совершенствовать и улучшать элементы как контактной сети (современные технологичные материалы, диагностические устройства, системы мониторинга и др.), так и токоприемников (снижение приведенной массы, повышение нагрузочной способности, стабилизация контактного нажатия, применение диагностических комплексов и др.).

Проведенный анализ повреждений элементов токоприемников электроподвижного состава в процессе эксплуатации показал, что большая их часть связана с повреждением контактных вставок, основной причиной чего является низкая нагрузочная способность, напрямую связанная с их перегревом при пропускании больших токов.

Нагрузочная способность токоприемника определяется максимальной величиной электрического тока, которую он способен безопасно передавать без перегрева или деформации своих элементов и узлов. ГОСТ 32204–2013 [2] устанавливает предельно допустимые значения температуры токопроводящих элементов токоприемника (в первую очередь полоза), достижение которых ограничивает максимальную величину допустимого длительного тока. Превышение нормируемых значений температуры полозов токоприемников, особенно на участках постоянного тока, может привести к их перегреву, снижению прочности, отслоению графита от медной оболочки, отжигу, разрушению контактной вставки и ее значительному износу (рисунок 1). По разным оценкам доля разрушений контактных элементов от термического воздействия составляет от 40 до 55 % от общего числа отказов [3, 4].

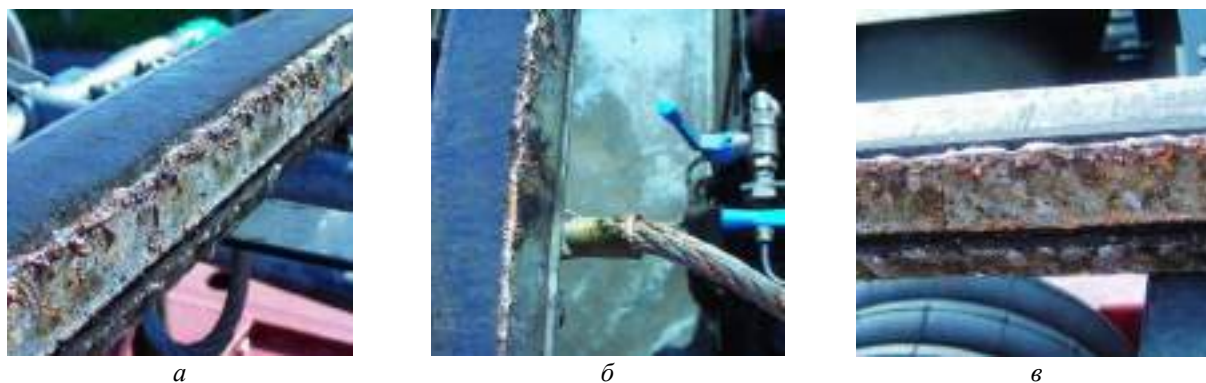


Рисунок 1 – Варианты повреждений полозов токоприемников при снятии больших токов

Существующие токоприемники не всегда обеспечивают достаточно высокую нагрузочную способность, что свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований рассматриваемой проблемы и совершенствования элементов конструкций токоприемников.

Повышение нагрузочной способности токоприемников можно реализовать следующими способами (рисунок 2): стабилизацией контактного нажатия токоприемника на контактный провод за счет применения систем автоматического регулирования; делением снимаемого с контактного провода тока за счет увеличения количества работающих токоприемников или рядов контактных вставок; снижением времени протекания тягового тока за счет чередования поднятых токоприемников; охлаждением верхнего узла токоприемника путем применения систем естественного и принудительного охлаждения [5]. Наиболее перспективным способом повышения нагрузочной способности токоприемников является охлаждение полозов токоприемников, так как в этом случае воздействие для снижения температуры оказывается на наиболее нагретый элемент токоприемника.

При стоянке электроподвижного состава наиболее нагретой частью полоза является точка контакта его с контактным проводом, которая зависит от места расположения токоприемника

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

в пролете, при движении – средняя часть, что объясняется зигзагообразным расположением контактного провода.

Действие существующих систем охлаждения токоприемника в основном направлено на улучшение отведения тепла от его нагретых частей, однако несмотря на широкое применение этих систем они имеют определенные недостатки: системы естественного охлаждения эффективны только при наличии встречного воздушного потока, системы принудительного охлаждения требуют изменения конструкции и установки дополнительных устройств, что приводит к увеличению приведенной массы токоприемника.

Активные системы охлаждения токоприемников предполагают применение дополнительных механизмов отведения тепла от нагретых частей. К таким механизмам можно отнести использование насосов, элементов Пельтье, охладителя (сжатый воздух или газ, жидкий хладагент) и др. Данные системы особенно необходимы при стоянке электроподвижного состава.

Пассивные системы охлаждения токоприемников предусматривают отведение тепла от нагретых частей за счет внешнего воздействия окружающей среды (например, встречного воздушного потока), что эффективно при движении электроподвижного состава, к таким системам относятся полозы с отверстиями в каркасе или контактных вставках, с конфузорами, оребрение каркаса полоза.



Рисунок 2 – Способы повышения нагрузочной способности токоприемников

Эффективность пассивных систем охлаждения увеличивается с ростом скорости движения электроподвижного состава, однако при стоянке она снижается, в то время как активные системы не зависят от скорости движения. При этом пассивные системы более просты и экономичны ввиду отсутствия затрат на энергопотребление дополнительных устройств.

Для повышения нагрузочной способности токоприемников в Омском государственном университете путей сообщения разработан полоз (рисунок 3), выполненный в виде каркаса 1 из электропроводящего материала с установленными на нем контактной вставкой 2 и

пластинами 3, между каркасом 1 и контактной вставкой с пластинами расположены тепловые трубки 4, обеспечивающие отвод тепла от более нагретого места (центра вставки) к более холодным частям полоза (концам контактной вставки и каркасу полоза) [6].

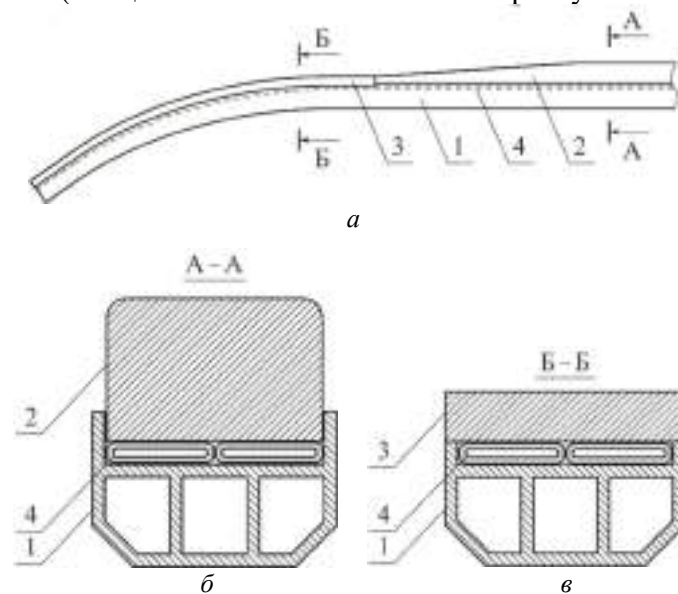


Рисунок 3 – Схема предлагаемого полоза токоприемника

Тепловые трубки представляют собой выполненные из материала с высокой теплопроводностью герметичные трубки с капиллярно-пористым покрытием внутри, заполненные рабочей жидкостью (теплоносителем). Принцип работы тепловой трубки заключается в переносе тепла за счет испарения рабочей жидкости на горячем конце трубки и ее конденсации на холодном конце, откуда жидкость под действием капиллярных сил перемещается обратно на горячий конец трубки.

Температурный диапазон тепловых трубок зависит от применяющейся в них рабочей жидкости: вода (от 25 до 300 °С); этанол (от 0 до 130 °С); метанол (от 10 до 130 °С); аммиак (от минус 60 до плюс 100 °С), фреон (от минус 40 до плюс 120 °С).

К преимуществам тепловых трубок можно отнести долговечность (срок службы – не менее 20 лет, несколько тысяч циклов замерзания/таяния хладагента без повреждения капилляров); теплопроводность (до 6000 Вт/мК) и эффективность передачи тепла; надежность (естественная циркуляция теплоносителя, отсутствие подвижных частей, возможность работы при любом положении в пространстве за счет капиллярных сил).

Принцип работы предлагаемого полоза токоприемника следующий. При движении электроподвижного состава полз токоприемника взаимодействует с контактным проводом, обеспечивая передачу электрической энергии к тяговым двигателям. В результате этого взаимодействия происходит нагрев контактной вставки за счет протекания тягового тока и трения с контактным проводом, причем наибольший нагрев контактной вставки будет наблюдаться в ее середине вследствие зигзагообразного расположения контактного провода. При нагреве соединенной с контактной вставкой тепловой трубки рабочая жидкость в ней испаряется, образуя пар, который перемещается в холодную часть трубки, где происходит его конденсация. За счет отведения тепла из нагретой средней части полоза к его краям происходит увеличение поверхности рассеивания тепла в окружающую среду, что способствует охлаждению полоза токоприемника. Количество рядов тепловых трубок может меняться в зависимости от конструктивного исполнения полоза токоприемника.

Таким образом, предлагаемый полз токоприемника с тепловыми трубками можно отнести к пассивным системам охлаждения, не требующим дополнительных источников питания, но в то же время он обладает свойством активных систем охлаждения – способностью эффективно работать при стоянке электроподвижного состава.

Для проверки работоспособности предлагаемого технического решения выполнено его математическое моделирование в среде SolidWorks с использованием приложения FlowSimulation [7]. Моделирование работы тепловых трубок осуществлялось путем изменения теплопроводности материала, из которого они изготовлены, до 6000 Вт/мК. Порядок моделирования: тепловая трубка соединяется с источником тепла (нагревателем), после чего задаются граничные условия (температура нагревателя и температура окружающей среды, тепловое сопротивление между нагревателем и трубкой, коэффициент конвекционной теплоотдачи, время расчета) и проводится расчет. Проверка работоспособности разработанной модели тепловой трубки показала эффективность ее применения за счет быстрого отведения тепла от нагревателя к более холодным частям тепловой трубки [8, 9].

Температурное воздействие тягового тока, протекающего через полз токоприемника, имитируется путем его взаимодействия с источником тепла, нагрев которого можно задавать двумя способами:

установление постоянной температуры нагревателя, принимаемого за источник бесконечной мощности [8];

установление температуры нагревателя изменяемой тепловой мощностью в зависимости от тока, протекаемого в точке контакта. В этом случае расчет не ограничивается по времени, что позволяет увидеть эффективность тепловых трубок в течение продолжительного периода, поэтому при исследованиях использовался второй способ установления температуры нагревателя, при этом исследования проводились для металлокерамической контактной вставки ВЖ-3П для условий стоянки и движения электроподвижного состава.

При моделировании тепловых процессов при стоянке электроподвижного состава точка контакта между ползком токоприемника и контактным проводом зависит от степени (площади) износа контактного провода (рисунок 4, *а*), поэтому в качестве нагревателя использовался медный цилиндр с обрезанной нижней плоскостью, параллельной его оси (для имитации износа контактного провода), который располагается в середине полза. Поскольку на стоянке электроподвижной состав потребляет небольшой ток, то тепловая мощность принята равной 100 Вт. Воздействие встречного воздушного потока при исследовании тепловых процессов полза на стоянке не учитывается.

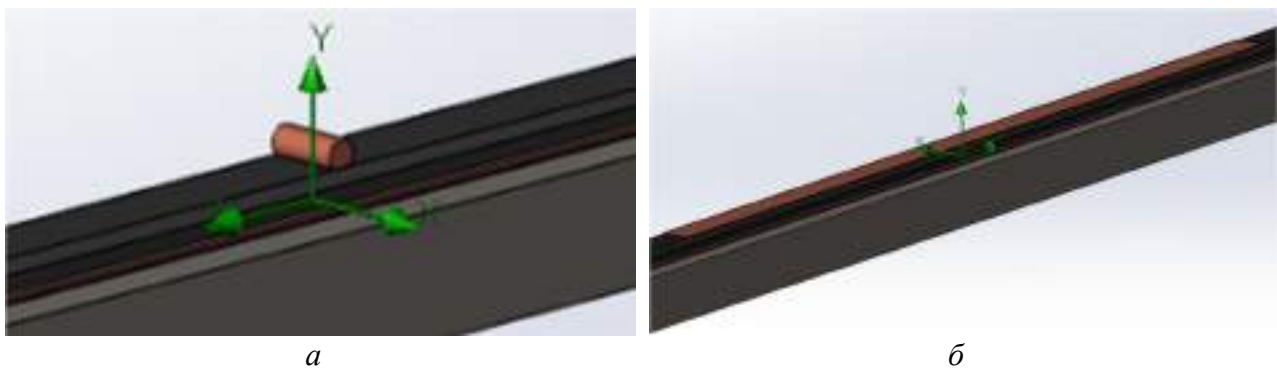


Рисунок 4 – Имитация контактного провода (нагревателя) на стоянке (*а*) и при движении (*б*) электроподвижного состава

Как видно из рисунка 5, *а*, при стоянке электроподвижного состава для полза, не оборудованного тепловыми трубками, максимальная температура наблюдается в его середине – в точке контакта с нагревателем, а далее снижается к его краям до температуры окружающей среды, что свидетельствует о слабом отводе тепла от точки контакта и возможном недопустимом перегреве в данной области. При использовании тепловых трубок в конструкции полза тепло из точки контакта отводится в его более холодные области (к краям полза), обеспечивая лучшее охлаждение, тем самым предотвращая перегрев полза.

При моделировании тепловых процессов при движении электроподвижного состава основная сложность заключается в задании перемещения нагревателя по длине полза,

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

поэтому его нагрев осуществлялся с помощью неподвижного контакта между вставкой и нагревателем, расположенным вдоль полоза на величину зигзага контактного провода (рисунок 4, б). Высота нагревателя принимается минимально возможной для обеспечения охлаждения полоза за счет обдува встречным воздушным потоком, скорость которого принимается равной 160 км/ч. Тепловая мощность нагревателя принята равной 1000 Вт, поскольку при движении электроподвижного состава тяговый ток на порядок больше, чем на стоянке.

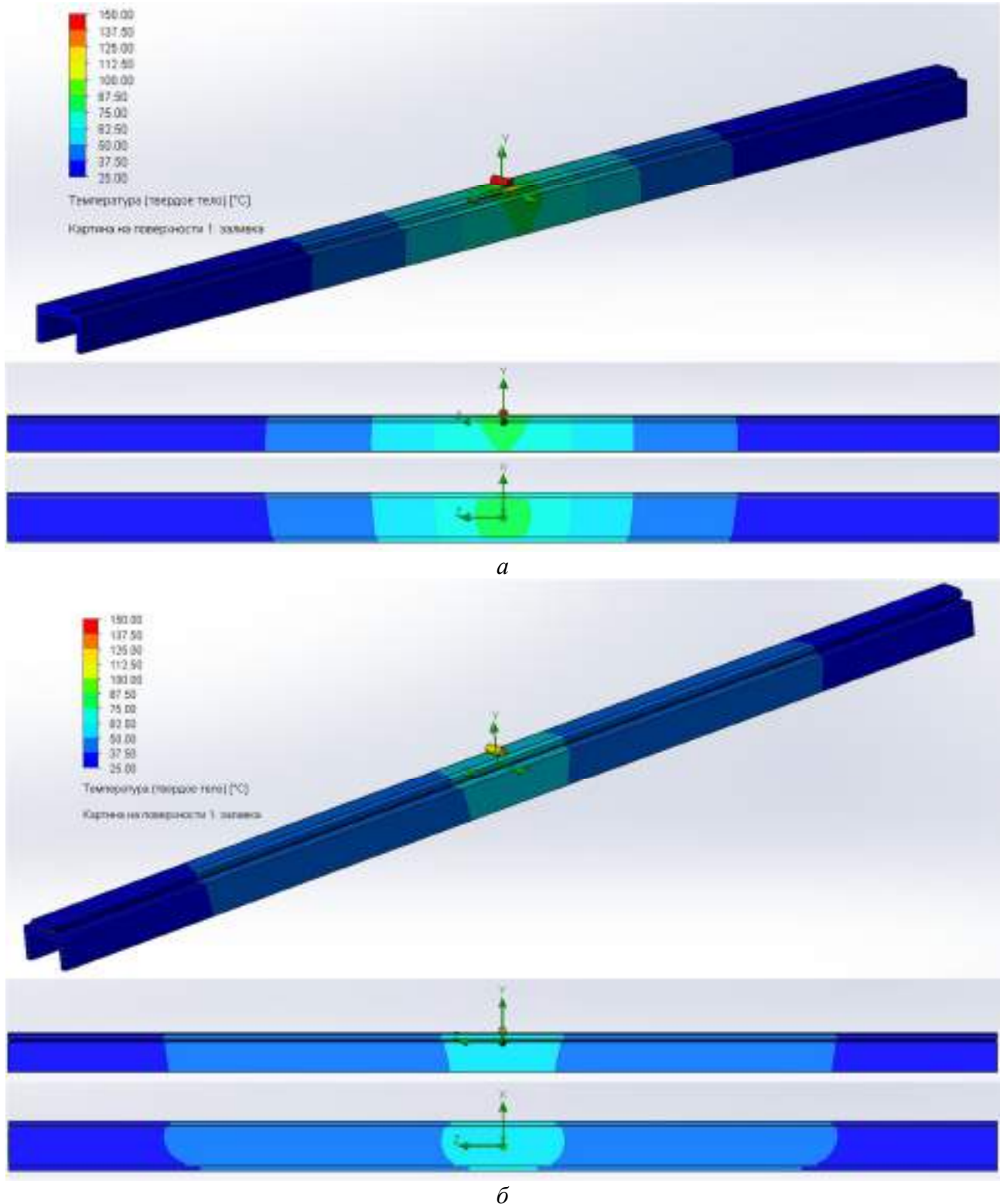


Рисунок 5 – Моделирование тепловых процессов полоза токоприемника на стоянке без использования тепловых трубок (а) и с ними (б)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

При движении электроподвижного состава у полоза, не оборудованного тепловыми трубками, максимальный нагрев возникает в средней части полоза, ширина которой определяется зигзагообразным перемещением контактного провода вдоль полоза при движении, и далее происходит уменьшение температуры нагрева ближе к краям полоза, при этом набегающий край полоза имеет меньшую температуру нагрева по сравнению со сбегающим из-за воздействия встречного воздушного потока (рисунок 6). При использовании тепловых трубок в конструкции полоза температура распределяется более равномерно по его длине, тем самым увеличивая площадь, от которой тепло рассеивается в окружающую среду, что позволит пропускать более высокие токи нагрузки.

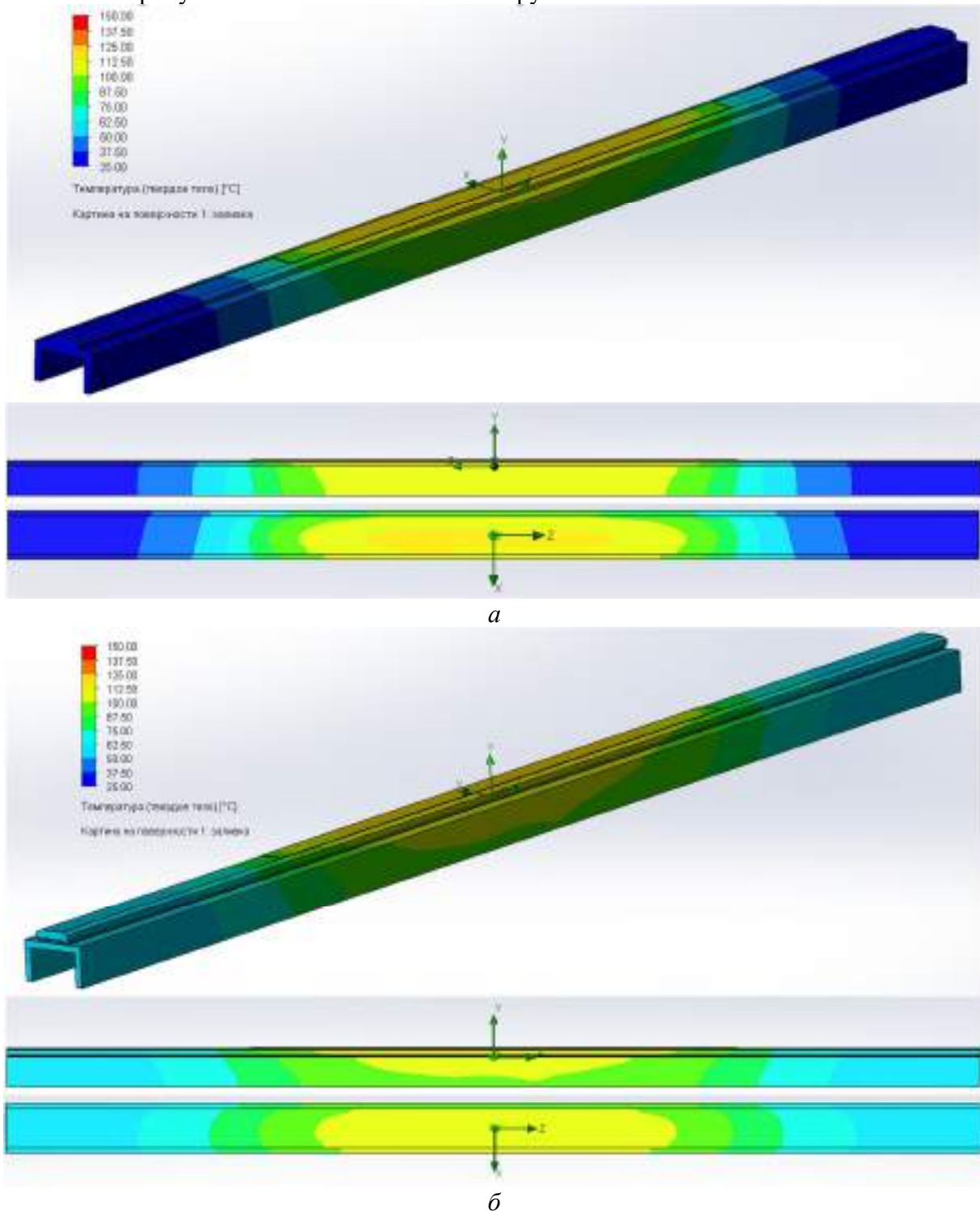


Рисунок 6 – Моделирование тепловых процессов полоза токоприемника при движении электроподвижного состава без использования тепловых трубок (а) и с ними (б)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Определение температуры нагрева контактной вставки осуществляется с помощью сертифицированного тепловизора или пирометра. По результатам измерений могут быть получены кривые распределения температуры нагрева контактной вставки по ее длине.

В эксплуатации нагрев контактной вставки происходит за счет протекания электрического тока в точке контакта между вставкой и контактным проводом, которая имеет определенное электрическое сопротивление. Поскольку величина тока определяется режимом ведения электроподвижного состава, то и температура нагрева полоза будет определяться величиной тока и иметь конечное значение, поэтому задание температуры нагревателя тепловой мощностью при моделировании тепловых процессов полоза при неограниченном расчете по времени позволяет получить результаты, приближенные к реальным. В случае задания при моделировании нагревателя источником с заданной температурой тепловая мощность нагревателя будет изменяться для поддержания заданной температуры, что приводит к отклонению получаемых результатов расчета от реальных значений.

Для подтверждения результатов моделирования тепловых процессов полоза, оборудованного тепловыми трубками, проведены лабораторные исследования. Схема экспериментальной установки (рисунок 7) содержит контактную вставку 1, закрепляемую на каркасе полоза 2 (металлическом профиле) посредством тепловых трубок или без них [10]. Для протекания переменного тока от источника 3 через контактную вставку первый электрод 4 прижимается к ней сверху с края с заданным нажатием, а второй электрод 5 – снизу (под первым электродом), поскольку при проведении эксперимента в первую очередь исследуется отведение тепла от точки контакта. При проведении измерений обдув полоза отсутствует, что соответствует работе токоприемника на стоянке. Для возможности сравнения результатов измерений работы полоза с тепловыми трубками и без них необходимо во время эксперимента задавать нагрев с одинаковыми значениями тепловой мощности.

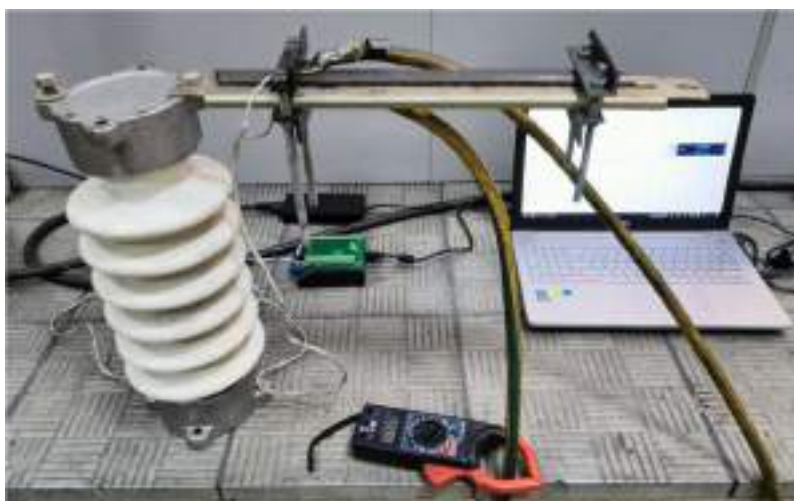
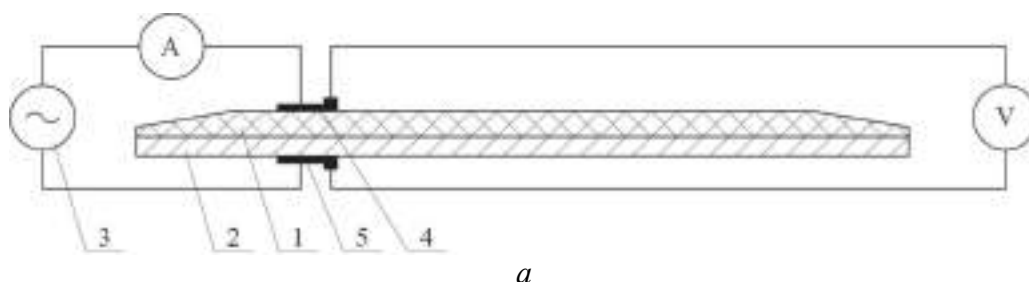


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки (а) для исследования тепловых процессов полоза и ее общий вид (б)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Измерения температуры контактной вставки проводились с интервалом пять минут (при достижении установившегося значения тепловой мощности) через каждые 50 мм по длине вставки. В ходе исследования тепловых процессов полоза ток изменялся от 100 до 300 А, в качестве измерительных приборов использовались токовые клещи и аналого-цифровой преобразователь. По результатам измерений построены зависимости распределения температуры нагрева контактной вставки без использования тепловых трубок и с ними (рисунок 8).

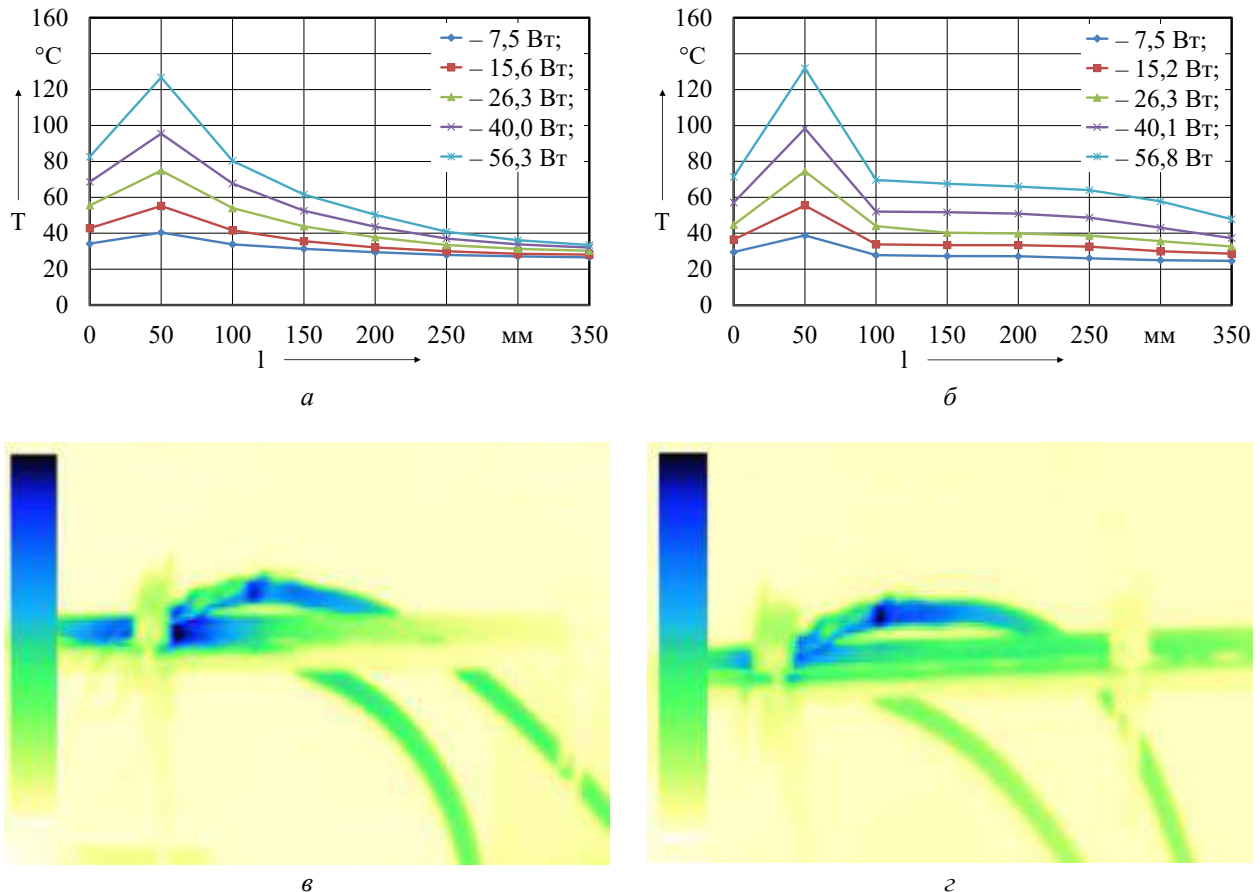


Рисунок 8 – Распределение температуры нагрева контактной вставки и ее термограммы при тепловой мощности 56,5 Вт без использования тепловых трубок (а, в) и с ними (б, г)

По результатам экспериментальных исследований видно, что в обоих случаях в точке контакта нагревателя с контактной вставкой наблюдается максимальная температура нагрева. Однако по мере удаления от точки контакта характер нагрева меняется, при отсутствии тепловых трубок край контактной вставки остается холодным, так как нагрев локализован у источника тепловой мощности и из-за низкой теплопроводности материалов к краю контактной вставки отводится небольшая часть тепла. При использовании тепловых трубок тепло распределяется по поверхности всей контактной вставки и каркаса полоза более равномерно и интенсивнее, чем без них, что позволяет более эффективно отводить тепло от наиболее нагретой части полоза в его холодные части.

Равномерное распределение тепла по поверхности полоза с тепловыми трубками из-за их высокой теплопроводности предотвращает перегрев контактных вставок, повышает нагрузочную способность всего токоприемника и надежность его работы, что будет способствовать более эффективному развитию скоростного, высокоскоростного и тяжеловесного движения поездов.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Проведенный анализ неисправностей токоприемников электроподвижного состава

показал, что их значительную часть составляют повреждения контактных вставок из-за термического воздействия, возникающего в результате протекания больших тяговых токов.

2. Для повышения нагрузочной способности токоприемников целесообразно применять простые и экономичные способы их охлаждения, которые будут эффективно работать как при движении электроподвижного состава, так и при его стоянке.

3. Разработана конструкция полоза токоприемника, оснащенного расположенными между контактными вставками и каркасом тепловыми трубками, которые обладают высокими показателями теплопроводности и надежности и позволяют поддерживать более низкую рабочую температуру, способствуя повышению нагрузочной способности токоприемника и предотвращению его перегрева.

4. Моделирование тепловых процессов в полозе, проведенное в программной среде SolidWorks, показало работоспособность и эффективность предложенного технического решения при различных режимах работы электроподвижного состава. Использование тепловых трубок в конструкции полоза способствует более равномерному распределению температуры по его длине, обеспечивая лучшее рассеивание тепла в окружающую среду. Результаты моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями на специализированной установке.

5. Применение разработанной конструкции полоза благодаря высокой теплопроводности тепловых трубок и естественной циркуляции в них рабочей жидкости позволит увеличить нагрузочную способность токоприемника, определяющую его максимально допустимый снимаемый ток, и снизить вероятность повреждения и разрушения контактных вставок в результате их перегрева.

Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года // mintrans.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010?ysclid=m88h4nz9f0181640924> (дата обращения: 24.02.2025).

2. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.

3. Тюрнин, П. Г. Экспериментальное определение токовой нагрузочной способности токоприемника / П. Г. Тюрнин, Н. В. Миронос, М. Н. Изергина. – Текст : непосредственный // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе. – Москва : Интекст, 2010. – С. 138–144. – EDN UWBYFR.

4. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосъеме, его надежности, экономичности и о путях совершенствования / Ю. Е. Купцов. – Москва : Модерн-А, 2001. – 256 с. – Текст : непосредственный.

5. Утепбергенова, С. М. Повышение эффективности использования электропоездов при продолжительном режиме работы в условиях тяжеловесного движения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2020. – 173 с. – Текст : непосредственный.

6. Патент № 2815458 Российская Федерация, МПК B60L 5/20 (2006.01). Полоз токоприемника электроподвижного состава : № 2023116111 : заявлено 16.06.2023 : опубликовано 18.03.2024 / Смердин А. Н., Чертков И. Е., Тарасенко А. В., Тарасов Ан. Н. – 7 с.: ил. – Текст : непосредственный.

7. Лунева, С. К. Моделирование процессов тепломассопереноса в программной среде SolidWorks/FlowSimulation / С. К. Лунева. – Текст : непосредственный // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2018. – № 2 (44). – С. 27–31. – EDN XQCQRV.

8. Совершенствование конструкции токоприемников электроподвижного состава для

повышения их нагрузочной способности / И. Е. Чертков, А. В. Тарасенко, Ан. Н. Тарасов, Ал. Н. Тарасов. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 38–42. – EDN ZCTBNW.

9. Тарасов, Ан. Н. Использование тепловых трубок для повышения нагрузочной способности токоприемников электроподвижного состава / Ан. Н. Тарасов, И. Е. Чертков. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения д.т.н., профессора, академика Российской академии транспорта В. П. Михеева, Омск, 25 – 27 октября 2023 г. / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 67–72. – EDN VDXQKY.

10. ГОСТ 32680–2014. Токосъемные элементы контактных токоприемников электроподвижного состава. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 14 с. – Текст : непосредственный.

References

1. *Strategiia razvitiia zheleznodorozhnogo transporta v RF do 2030 goda* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010?ysclid=m88h4nz9f0181640924> (accessed 24.02.2025).

2. GOST 32204–2013. Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 24 p. (In Russian).

3. Tyurnin, P.G. Experimental determination of the current-carrying capacity of a current collector. *Tokos"yem i tyagovoye elektrosnabzheniye pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke – Current collection and traction power supply for high-speed movement with direct current*. Moscow, Intext Publ., 2010, pp. 138-144. EDN UWBYFR. (In Russian).

4. Kuptsov Yu.E. *Besedy o tokos"eme, ego nadezhnosti, ekonomichnosti i o putiakh sovershenstvovaniia* [Conversations about current collection, its reliability, efficiency and ways of improvement]. Moscow, Modern-A Publ., 2001, 256 p. (In Russian).

5. Utepbergenova S.M. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniia elektrovozov pri prodolzhitel'nom rezhime raboty v usloviakh tiazhelovesnogo dvizheniia* (Increasing the efficiency of using electric locomotives in continuous operation under heavy-haul traffic conditions). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2020, 173 p. (In Russian).

6. Smerdin A.N., Chertkov I.E., Tarasenko A.V., Tarasov A.N. *Patent RU 2815458 C1*, 18.03.2024.

7. Luneva S.K. Modeling of heat and mass transfer processes in the software environment SolidWorks/FlowSimulation. *Technico-tehnologicheskie problemy servisa – Technical and technological problems of the service*, 2018, no. 2(44), pp. 27-31. EDN XQCQRV. (In Russian).

8. Chertkov I.E., Tarasenko A.V., Tarasov An.N., Tarasov Al.N. Improving the design of pantographs of electric rolling stock to increase their load capacity. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Bulletin of transport of the Volga region*, 2023, no. 3 (99), pp. 38-42. EDN ZCTBNW. (In Russian).

9. Tarasov An.N., Chertkov I.E. [Use of heat pipes to increase the load capacity of pantographs of electric rolling stock]. *Aktual'nye problemy proektirovaniia i ekspluatatsii ustroistv elektrosnabzheniia elektricheskogo transporta : materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennoi 90-letiiu so dnia rozhdeniia d.t.n., professora, akademika Rossiiskoi akademii transporta V.P. Mikheeva, Omsk, 25–27 oktiabria 2023 goda* [Actual problems of designing and operating electric power supply devices for electric transport : proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation dedicated to the 90th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Transport V.P. Mikheev, Omsk, October 25-27, 2023]. Omsk, 2023, pp. 67-72. EDN VDXQKY. (In Russian).

10. GOST 32680–2014. Electric rolling stock pantographs current collection contact elements. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 14 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лукьянова Олеся Андреевна

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) 31-34-46.

E-mail: fffoxx@mail.ru

Тарасов Андрей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: andr-kz@mail.ru

Чертков Иван Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: chertkovie@omgups.ru

Тарасенко Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Повышение нагрузочной способности токоприемников электроподвижного состава за счет совершенствования системы охлаждения полоза / О. А. Лукьянова, Ан. Н. Тарасов, И. Е. Чертков, А. В. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 23 – 35.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lukyanova Olesya Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric power supply of railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: fffoxx@mail.ru

Tarasov Andrey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department «Electric power supply of railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: andr-kz@mail.ru

Chertkov Ivan Evgenyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric power supply of railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: chertkovie@omgups.ru

Tarasenko Alexander Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Electric power supply of railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-46.

E-mail: alessandro-tar@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Lukyanova O.A., Tarasov An.N., Chertkov I.E., Tarasenko A.V. Increasing the electric rolling stock pantographs load capacity by improving the runner cooling system. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 23-35. (In Russian).

В. Л. Незевак, Р. Б. Скоков, Р. В. Павлова

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

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматривается решение задачи разработки имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока, предназначенной для оценки энергетических и других показателей работы, в том числе показателей качества электроэнергии. Разработка имитационной модели позволяет перейти к решению задач, связанных с оценкой эффективности технических мероприятий, которые могут применяться на тяговых подстанциях для повышения качества выпрямленного напряжения, снижения несинусоидальности на шинах собственных нужд, регулирования напряжения на шинах подстанций, выравнивания графика нагрузки и ряда других. Одной из актуальных задач в области нетягового электроснабжения является снижение несинусоидальности напряжений на шинах устройств сигнализации, централизации и блокировки, чувствительных к высокому уровню гармоник напряжения. На основе разработанной модели имитационное моделирование выполнено для одного из распространенных схемных решений – применения двенадцатипульсовых схем выпрямления последовательного типа. Предложенная модель разработана в программной среде SimInTech и позволяет оценить показатели работы подстанции для различных состояний схемы с помощью введенных в схему выключателей. Результаты моделирования приведены для симметричной системы синусоидальных напряжений источника питания. Сопоставление результатов моделирования выполнено с результатами, которые получены на основе экспериментальной оценки показателей качества электроэнергии для одной из действующих тяговых подстанций постоянного тока. Приведенные результаты измерений на тяговой подстанции с двенадцатипульсовыми выпрямителями последовательного типа выполнены синхронно для двух пар вводов 0,4 и 10 кВ тяговой подстанции. Сравнение результатов моделирования показывает адекватность полученных с помощью разработанной модели результатов и использованных в ней характеристик оборудования, что позволяет использовать ее для решения ряда других задач.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, постоянный ток, двенадцатипульсовый выпрямитель, показатели качества электроэнергии, имитационная модель, программная среда SimInTech, несинусоидальность напряжений, коэффициент искажения.

Vladislav L. Nezevak, Ruslan B. Skokov, Raisa V. Pavlova

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

APPLICATION THE DC TRACTION SUBSTATION SIMULATION MODEL TO ASSESS THE QUALITY OF ELECTRICITY

Abstract. The article discusses the solution of problems related to the development of a simulation model of a DC traction substation designed to evaluate energy and other performance indicators, including electricity quality indicators. The development of a simulation model makes it possible to evaluate the effectiveness of technical measures that can be used at traction substations to solve problems of improving the quality of rectified voltage, reducing non-sinusoidal busbars for their own needs, regulating the voltage on substation tires, and a number of others. Currently, the urgent tasks in the field of non-traction power supply include reducing the non-sinusoidal voltage on the busbars of alarm, centralization and blocking consumers who are sensitive to high voltage harmonics. The simulation was performed for one of the most common circuit solutions, characterized by the fact that a twelve-pulse rectification circuit of a sequential type is used at the substation. The proposed model was developed in the SimInTech software environment and allows you to evaluate the performance of a substation for various circuit states using switches inserted into the circuit. The simulation results are given for a symmetric system of sinusoidal voltages. The simulation results are compared with the results obtained on the basis of an experimental assessment of electricity quality indicators for one of the operating DC traction substations. The above measurement results at a traction substation with twelve-pulse rectifiers of a sequential type were performed synchronously for two pairs of inputs of 0.4 and 10 kV of the traction substation. A comparison of the simulation results shows the adequacy of the developed model and the equipment characteristics used in it, which makes it possible to use it to solve a number of other tasks.

Keywords: traction power supply system, traction substation, direct current, twelve-pulse rectifier, power quality indicators, simulation model, SimInTech software environment, non-sinusoidal voltage, distortion factor.

Энергетические показатели работы тяговых подстанций, к которым традиционно относят потребляемую мощность и объемы электропотребления, потери мощности и электроэнергии и т.п., а также показатели качества электроэнергии (отклонения напряжения, несинусоидальность и несимметрия напряжений и др.) в большей степени определяются нагрузкой электроподвижного состава. Неравномерность нагрузки электроподвижного состава и применяемые на тяговых подстанциях схемы преобразовательных агрегатов определяют резкопеременный график электрической нагрузки и несинусоидальность напряжений. Специфика тяговой нагрузки подстанций предопределяет существующую проблематику энергоэффективности и качества электроэнергии, отклонение показателей которого от нормативных значений регистрируется как в точках общего присоединения потребителей, так и на шинах нетяговых электроприемников, чувствительных к превышению допустимых уровней таких показателей, как несимметрия и несинусоидальность, отклонения и провалы напряжения и др. В настоящее время на большинстве тяговых подстанций постоянного тока эксплуатируются мостовые схемы выпрямления, в частности, широко распространены двенадцатипульсовые схемы последовательного и параллельного типа. В зависимости от эксплуатируемых схем выпрямления в сетевых обмотках преобразовательных трансформаторов наблюдается искажение тока, приводящее к соответствующей несинусоидальности напряжений на шинах переменного тока, к которым присоединены названные трансформаторы. В указанных случаях несинусоидальность напряжения регистрируется и на шинах низшего напряжения трансформаторов собственных нужд, от которых подключены линии электропередач потребителей сигнализации, централизации и блокировки, и может приводить к нестабильной работе их электроприемников и в ряде случаев – к снижению уровня безопасности движения поездов. В связи с этим разработка технических решений по повышению качества электроэнергии, основанная на анализе энергетических процессов и выявлении основных закономерностей в системе тягового электроснабжения, относится к актуальным задачам.

Одной из задач повышения качества электроэнергии на тяговых подстанциях является задача снижения несинусоидальности напряжений на шинах низкого напряжения, от которых подключены нетяговые потребители (в частности, СЦБ). Тяговая нагрузка оказывает значительное влияние на показатели качества электроэнергии и уровень напряжения и зависит от ряда параметров и характеристик оборудования, а также схемных решений [1 – 5]. Оценка указанных изменений может быть выполнена на основе измерений с помощью регистрации энергетических показателей и показателей качества электроэнергии [6], а также на основе имитационного моделирования [7, 8]. Моделирование позволяет существенно сократить затраты, связанные с измерениями показателей качества электроэнергии и оценки эффективности технических мероприятий. Разработка имитационной модели тяговой подстанции в дальнейшем позволяет перейти к оценке эффективности различных устройств по повышению качества электроэнергии и выбору оптимальных законов регулирования их параметров на основе статистических показателей и закономерностей [9]. Для решения указанной задачи требуется разработать подходы по оценке показателей качества электроэнергии на тяговых подстанциях.

Тяговая подстанция постоянного тока, как правило, имеет резерв силового оборудования. Традиционная однолинейная схема содержит силовые понижающие и преобразовательные трансформаторы, трансформаторы собственных нужд и электроснабжения СЦБ. Структурная схема промежуточной тяговой подстанции с условным указанием состояния основных коммутационных аппаратов приведена на рисунке 1. На схеме высоковольтные выключатели В1-110, В2-110 и другие, кроме ВС-10 и ВТП-10, показаны во включенном состоянии. Рассмотренное оперативное состояние коммутационных аппаратов используется на тяговых подстанциях с целью обеспечения качества электроэнергии, что достигается путем разделения питания тяговой нагрузки и нетяговых потребителей с разных систем шин (секций) 6 (10) кВ.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

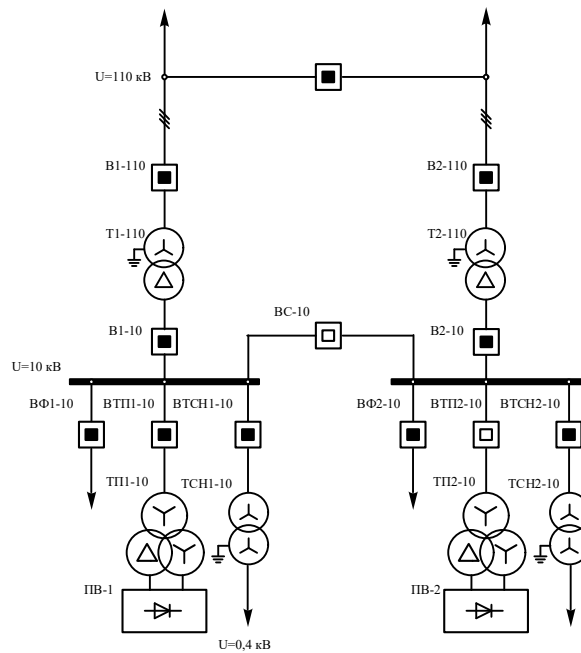


Рисунок 1 – Структурная схема тяговой подстанции постоянного тока

Для формирования модели тяговой подстанции постоянного тока используется двенадцатипульсовая схема выпрямления последовательного типа, принципиальная схема которой приведена на рисунке 2.

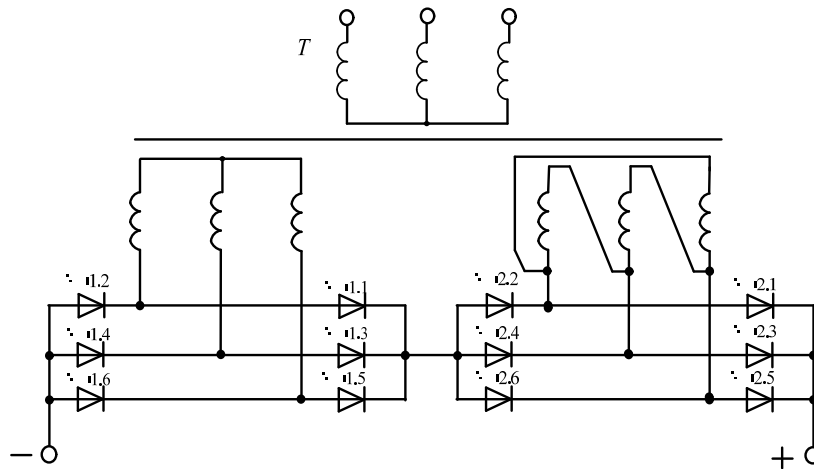


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема двенадцатипульсового выпрямителя

Подключение потребителей собственных нужд тяговой подстанции, в том числе линий электропередач для электроснабжения потребителей СЦБ, выполнено с использованием силовых трансформаторов собственных нужд (ТСН), зарядно-подзарядных устройств, обеспечивающих работу аккумуляторной батареи и других потребителей, подключенных к шинам систем оперативного постоянного тока (СОПТ), трансформаторов СЦБ (рисунок 3).

Для формирования имитационной модели в соответствии с рассматриваемыми схемами (см. рисунки 1 – 3) используются модели основных элементов (генератор, силовой трансформатор, выключатель, амперметр, вольтметр, диод, активное и индуктивное сопротивление). В качестве питающих подстанций в имитационной модели используется два источника напряжения, работа которых синхронизирована между собой, а фазные напряжения описываются системой уравнений:

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

$$\begin{cases} u_A = U_{mA} \sin(\omega t + \alpha); \\ u_B = U_{mB} \sin(\omega t + \beta); \\ u_C = U_{mC} \sin(\omega t + \gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где U_{mA} , U_{mB} и U_{mC} – амплитудные значения напряжения фаз А, В и С соответственно питающего центра;

α , β и γ – фазовые углы напряжений фаз А, В и С соответственно.

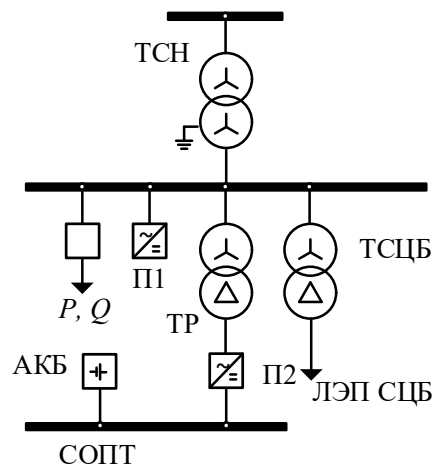


Рисунок 3 – Структурная схема собственных нужд тяговой подстанции

Получаемые на протяжении последних десятилетий оценки качества электроэнергии на шинах тяговых подстанций свидетельствуют о наличии несимметрии и несинусоидальности напряжений, которые могут оказывать влияние на работу различных электроприемников. Как правило, на шинах высшего напряжения тяговых подстанций постоянного тока уровень несимметрии напряжений относительно низкий, находится в допустимых диапазонах и не оказывает существенного влияния на работу электроприемников, в частности, потребителей нетяговых нужд. В то же время несинусоидальность напряжений, регистрируемая на тяговых подстанциях постоянного тока, может приближаться к критическим значениям, что обусловлено работой выпрямительных преобразователей. В связи с этим для оценки энергетических показателей в дальнейшем результаты моделирования приведены для варианта, в котором исключено влияние на качество электроэнергии других приемников и предусматривается, что источники питания тяговых подстанций характеризуются симметричными и синусоидальными системами фазных напряжений.

Параметры силовых и преобразовательных трансформаторов, а также силовых трансформаторов собственных нужд и электроснабжения СЦБ приняты исходя из номинальных параметров трансформаторов марок ТДТН-16000/110/10, ТРДП-12500/10, ТМ-250/10/0,4 и ТМ-160/10/0,4 соответственно. Параметры выпрямительного преобразователя приняты для выпрямителя типа ТПЕД-3150-3,3к, выполненного на лавинных диодах типа ДЛ133-500-14.

Искажение кривой напряжения оценивается с помощью коэффициента искажения напряжения по отношению напряжения первой гармоники к среднеквадратичному значению напряжения на шинах подстанции по выражению:

$$K_{иU} = \frac{U^{(1)}}{U}, \quad (2)$$

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

где $U_{(1)}$ и U – напряжение первой гармоники (50 Гц) и среднеквадратичное напряжение соответственно.

Доля высших гармоник напряжения оценивается для n -й гармоники по формуле:

$$K_{и(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}}, \quad (3)$$

где $U_{(n)}$ – напряжение n -й гармоники.

Имитационная модель тяговой подстанции разработана в программной среде SimInTech в соответствии с рассмотренными выше схемами. Фрагменты модели для основных присоединений (ввода силового понижающего трансформатора, преобразовательного агрегата, трансформатора ТСН, СОПТ и трансформатора СЦБ) приведены на рисунках 4 и 5. Для оценки уровня гармонических составляющих тока и напряжения используются коэффициенты искажений напряжения, расчет которых выполняется с помощью блоков «Спектральная плотность» и «График Y от X». Настройка указанных блоков по размеру серии позволяет выделить высшие гармоники напряжения и тока, частота которых кратна основной частоте (50 Гц) и оценить уровень тока и напряжения по каждой гармонике. Моделирование нагрузки, присоединенной к шинам 0,4 и 10 кВ, выполнено с использованием блоков «Нагрузка RLC», которые позволяют задавать уровень активной и реактивной мощности, потребляемой соответствующими потребителями.

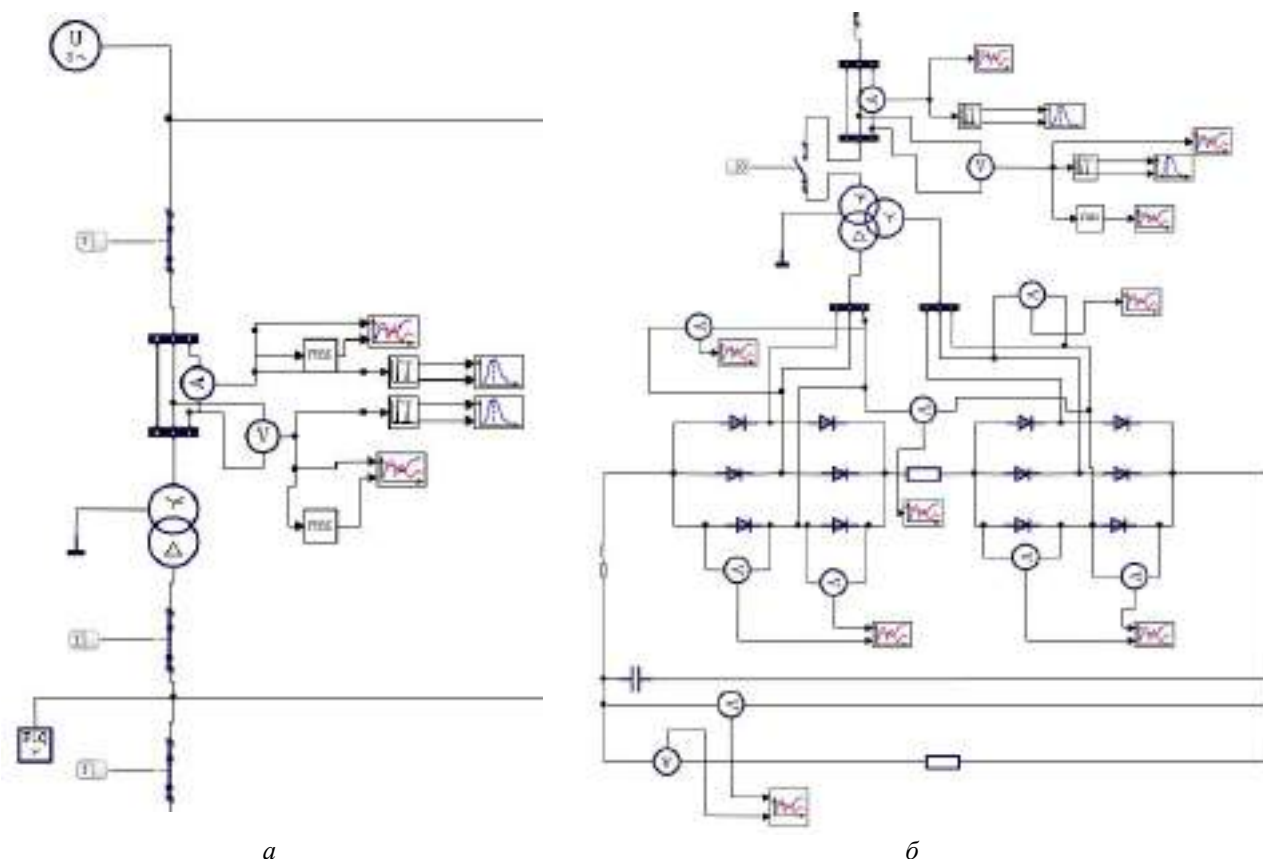


Рисунок 4 – Модель ввода силового понижающего трансформатора (а) и преобразовательного агрегата (б) тяговой подстанции

В имитационной модели содержатся системы собственных нужд переменного тока и СОПТ, построенные с использованием блоков «Преобразователь 3-фазный мостовой» (питание отдельных электроприемников, содержащих преобразователи, работа зарядно-

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

подзарядного устройства), а также блоков «Нагрузка RLC» и «Аккумулятор электрический» для формирования модели аккумуляторной батареи подстанции (см. рисунок 5). Наличие преобразователей малой мощности, подключенных к шинам трансформатора ТСН, оказывает дополнительное влияние на несинусоидальность напряжений на шинах 0,4 кВ, оценка для высших гармоник которого приведена ниже.

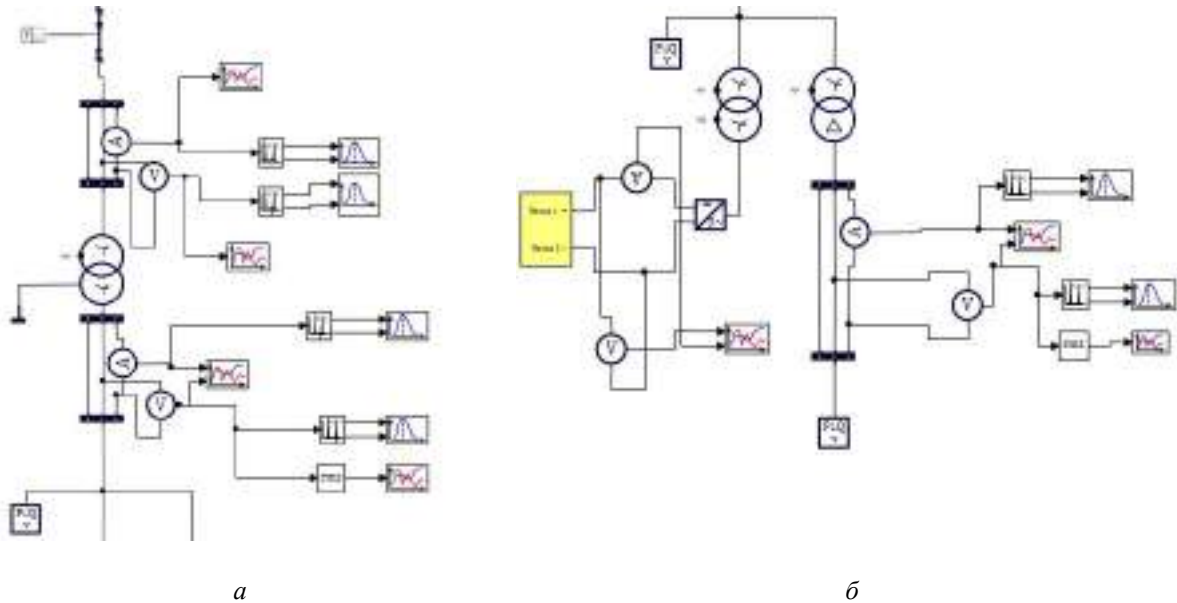


Рисунок 5 – Модель ввода трансформатора собственных нужд (*а*) и схемы питания собственных нужд и потребителей СЦБ (*б*) тяговой подстанции

Моделирование выполнено для нормальной схемы тяговой подстанции, рассмотренной выше (см. рисунок 1). Результаты оценки энергетических показателей и качества электроэнергии приведены для условий раздельной работы двух силовых трансформаторов подстанции на отдельные секции (шины). Результаты моделирования приведены для продолжительности расчетов 0,2 с, в течение которого уровень тяговой нагрузки достигает установившихся значений. Результаты расчетов позволяют построить спектры напряжений на шинах 10 и 0,4 кВ в программной среде SimInTech, которые приведены на рисунках 6 и 7 соответственно.

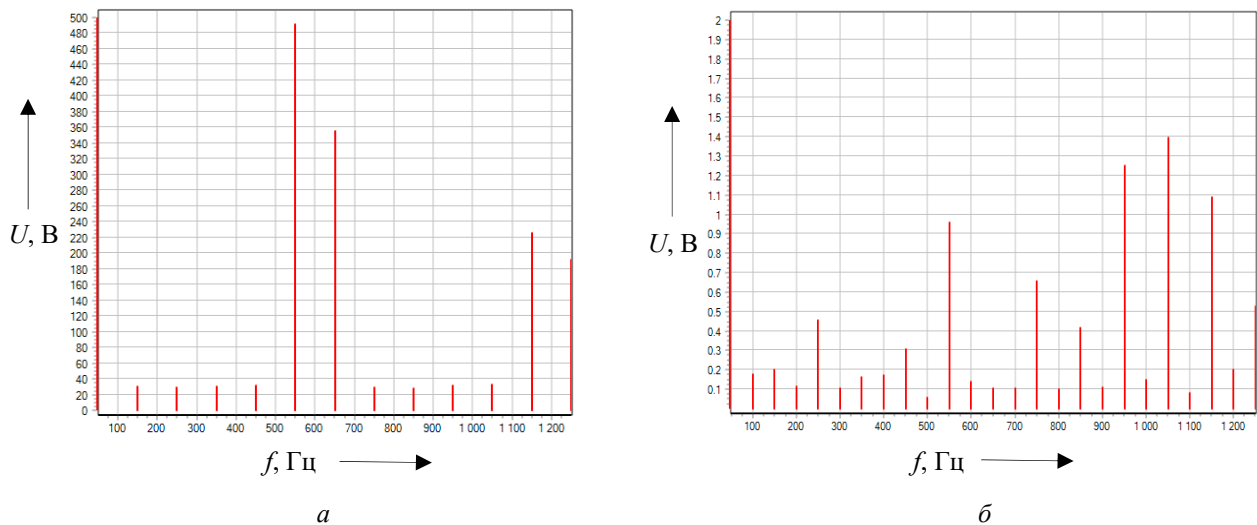


Рисунок 6 – Спектр гармоник напряжения на шинах 10 кВ для ввода 1-10 (*а*) и ввода 2-10 (*б*)

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

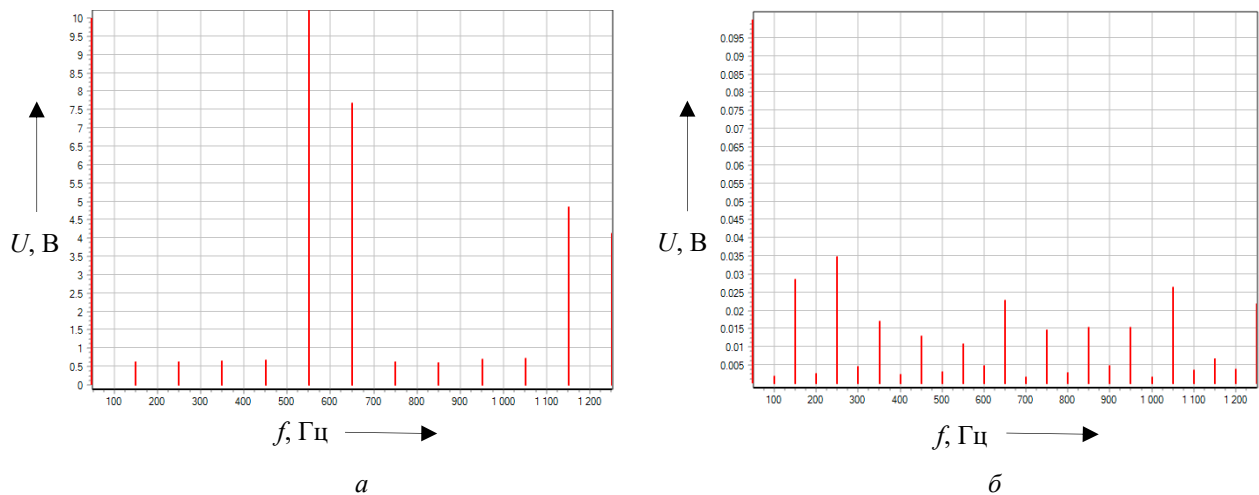


Рисунок 7 – Спектр гармоник напряжения на шинах 0,4 кВ ввода 1-0,4 (а) и ввода 2-0,4 (б)

По результатам расчета коэффициентов искажения и высших гармоник напряжения (для 11-й и 13-й гармоник) построены графики зависимости указанных искажений от уровня тяговой нагрузки I_d , определяемой относительно номинального тока выпрямительного преобразователя $I_{d\text{ном}}$ по выражению:

$$k_n = \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \quad (4)$$

Полученные результаты моделирования представлены с помощью уравнений линейной регрессии, рассчитанных методом наименьших квадратов, и приведены на рисунке 8.

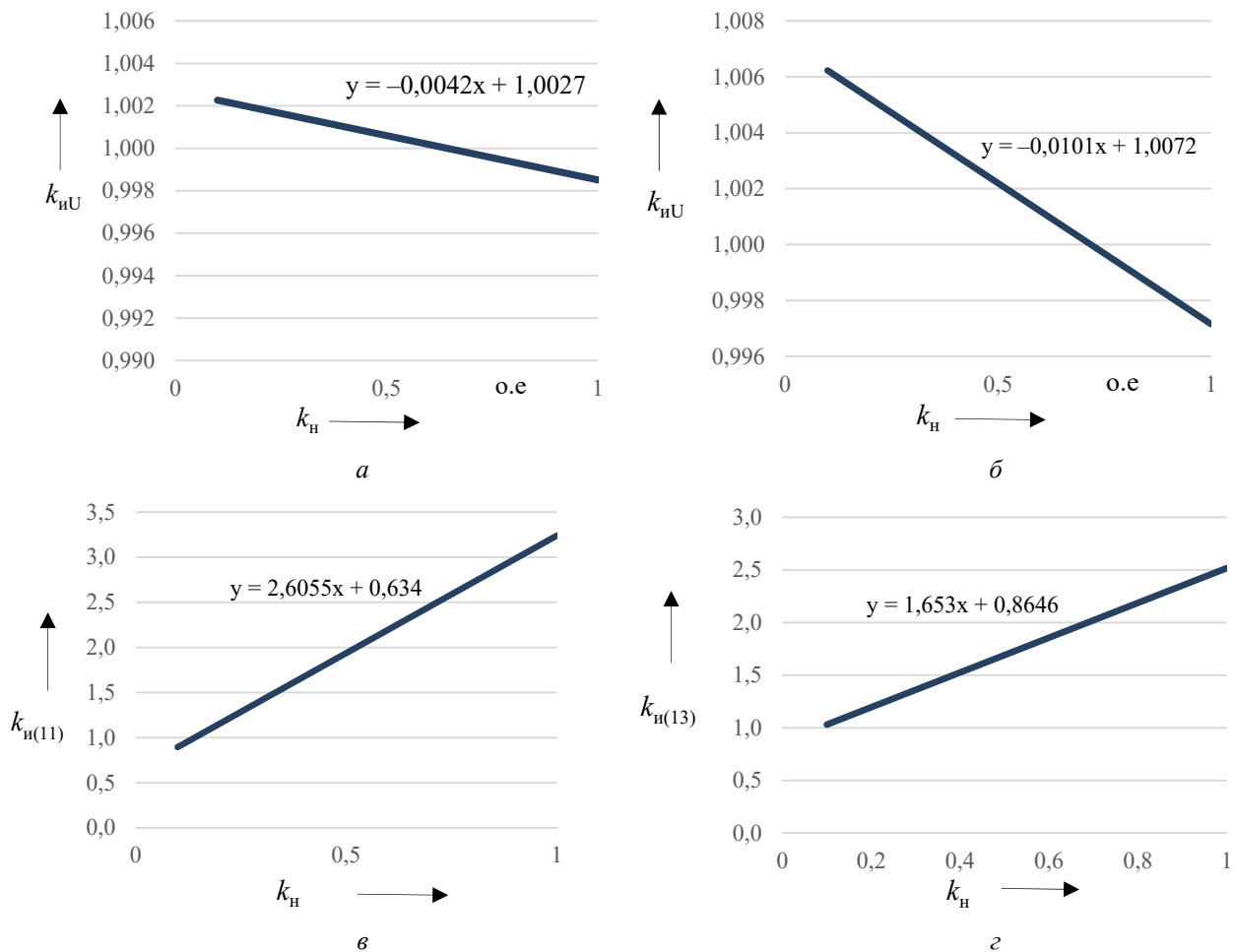


Рисунок 8 – Коэффициент искажения напряжения по вводам трансформаторов 1-10 (а) и 1-0,4 (б), коэффициенты 11-й (в) и 13-й (г) гармоник напряжения ввода 1-0,4

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Полученные результаты согласуются с классическим представлением о спектральном составе токов и напряжений на тяговых подстанциях постоянного тока, особенности формирования которого обусловлены работой выпрямительных преобразователей. В частности, в спектре напряжения доминируют высшие гармоники, номера которых зависят от количества пульсаций в кривой выпрямленного напряжения:

$$n = km \pm 1, \quad (5)$$

где k – ряд целых чисел;

m – число пульсаций в кривой выпрямленного напряжения.

Регистрация показателей качества электроэнергии, выполненная на тяговой подстанции, позволяет оценить динамику изменения показателей и их выход за допустимые границы. Ниже приведены результаты регистрации и анализа показателей качества электроэнергии для одной из действующих тяговых подстанций Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – филиала Трансэнерго. Синхронные измерения выполнялись с использованием двух анализаторов качества электроэнергии «Энергомера», подключенных к трансформаторам тока ввода 1-10 и трансформаторам напряжения 10 кВ (первый прибор), к трансформаторам тока и шинам напряжением 0,4 кВ ТСН (второй прибор). Аналогичные измерения выполнены для других трансформаторов Т2-110 (ввод 10 кВ) и ТСН (ввод 0,4 кВ). На подстанции в эксплуатации находятся двенадцатипульсовые выпрямители.

Обработка данных измерений позволяет построить спектры напряжений по усредненным за период измерений значениям. Указанные гистограммы для высших гармоник до 25-й гармоники включительно приведены на рисунке 9 (для шин напряжением 10 кВ) и на рисунке 10 (для шин напряжением 0,4 кВ). Гистограмма напряжений на стороне 10 кВ показывает преобладание в спектре нечетных гармоник (3-я, 5-я, 7-я и др.) помимо характерных для работы двенадцатипульсового выпрямителя (11-й, 13-й, 23-й, 25-й и т. д.). Коэффициенты высших гармоник для обоих вводов 10 кВ не превышают значения 0,6 % и соответствуют нормам, содержащимся в ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Указанная картина наблюдается для обоих вводов 10 кВ силовых трансформаторов. Наличие в спектре других гармоник объясняется режимами работы различных потребителей, присоединенных к шинам 10 кВ. При рассмотрении спектра напряжения на шинах 0,4 кВ ТСН наиболее выражены 11-я и 13-я гармоники, при этом наблюдается усиление коэффициентов высших гармоник, которые возрастают и достигают уровня 2 %. Суммарное гармоническое искажение THD для вводов 10 кВ по трем фазам находится в диапазонах 0,52 – 0,58 (для ввода 1-10) и 0,65 – 0,74 (для ввода 2-10).

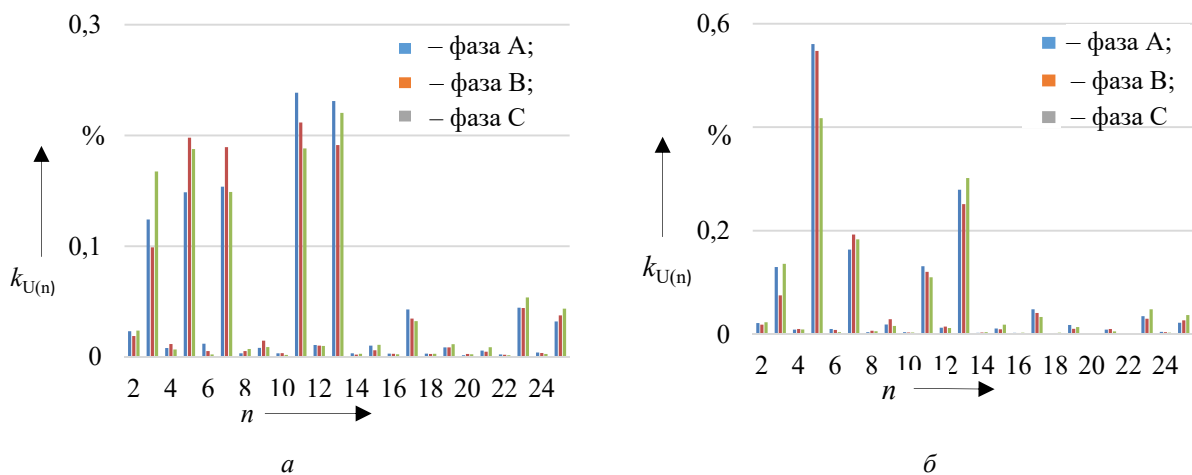


Рисунок 9 – Диаграмма спектра напряжения по вводу 1-10 (а) и по вводу 2-10 (б)
(значения для фаз А, В и С приведены подряд для каждой из n гармоник)

Значения гармонических искажений для напряжения 0,4 кВ ТСН выше, чем для напряжения 10 кВ. Значения THD для напряжений ТСН находятся в диапазонах 2,49 – 2,67 (для ввода 1-0,4) и 2,62 – 2,77 (для ввода 2-0,4).

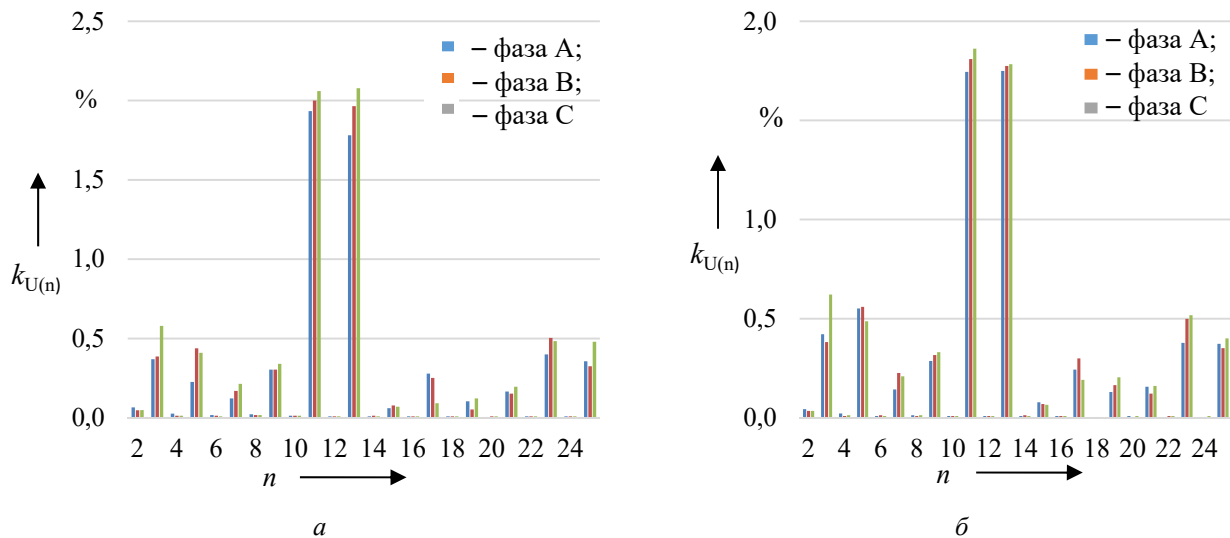


Рисунок 10 – Диаграмма спектра токов по вводу 1-0,4 (а) и по вводу 2-0,4 (б) (значения для фаз А, В и С приведены подряд для каждой из n гармоник)

Корреляция высших гармоник напряжений с мощностью, потребляемой по вводу низшего напряжения силового трансформатора (10 кВ) и определяемого в большей мере тяговой нагрузкой, показывает увеличение уровня гармоник при росте потребляемой полной мощности. Указанная корреляция подтверждается результатами регистрации показателей качества на тяговой подстанции (рисунок 11), коэффициент корреляции находится на уровне 0,8.

Таким образом, результаты имитационного моделирования показывают изменение степени искажения напряжения в зависимости от уровня тяговой нагрузки в диапазоне 0,998 – 1,006 для шин 0,4 кВ и в аналогичном диапазоне для шин 10 кВ (рисунок 12). При этом коэффициент искажения уменьшается при росте тяговой нагрузки. Указанные результаты корреспондируют с результатами экспериментальной оценки коэффициента искажения напряжения на шинах 0,4 и 10 кВ действующей тяговой подстанции постоянного тока. Коэффициенты гармоник напряжения по результатам моделирования изменяются в диапазоне 1,0 – 3,5 % для 11-й гармоники и 1,0 – 2,5 % для 13-й гармоники.

По результатам регистрации показателей качества электроэнергии коэффициент гармоник напряжения на шинах 0,4 кВ для 11-й и 13-й гармоник находится в диапазоне 0,30 – 3,54 и 0,26 – 3,61 % соответственно, для ввода 2 – в диапазоне 0,25 – 3,28 и 0,27 – 3,29 % соответственно. Коэффициент искажения напряжения при увеличении тяговой нагрузки при моделировании уменьшается, при этом коэффициент наклона зависимости, полученный при моделировании, больше, чем полученный при измерениях, что связано с допущениями, принятыми при моделировании и в процессе измерений при определении нагрузки по вводу силового трансформатора.

В целом полученные результаты моделирования при оценке высших гармоник по уровню и полученной зависимости (рост коэффициентов гармоник напряжения при увеличении потребляемой мощности нагрузки) соответствуют данным экспериментальной оценки высших гармоник напряжения.

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

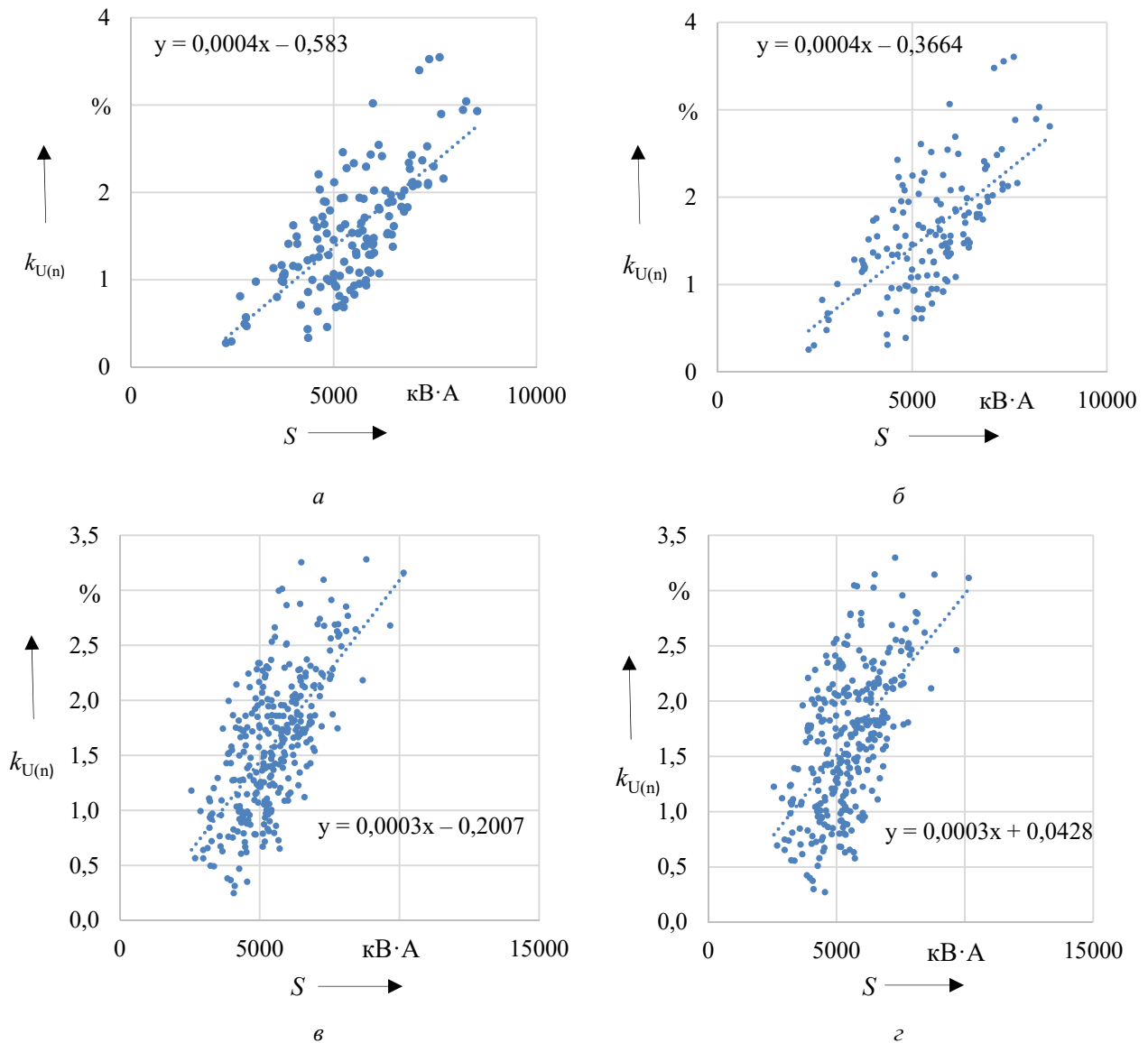


Рисунок 11 – Коэффициенты высших гармоник напряжения для ввода 1-0,4 11-й (*a*) и 13-й (*б*), 11-й (*в*) и 13-й (*г*) для ввода 2-0,4 в зависимости от полной мощности по вводам 1-10 и 2-10

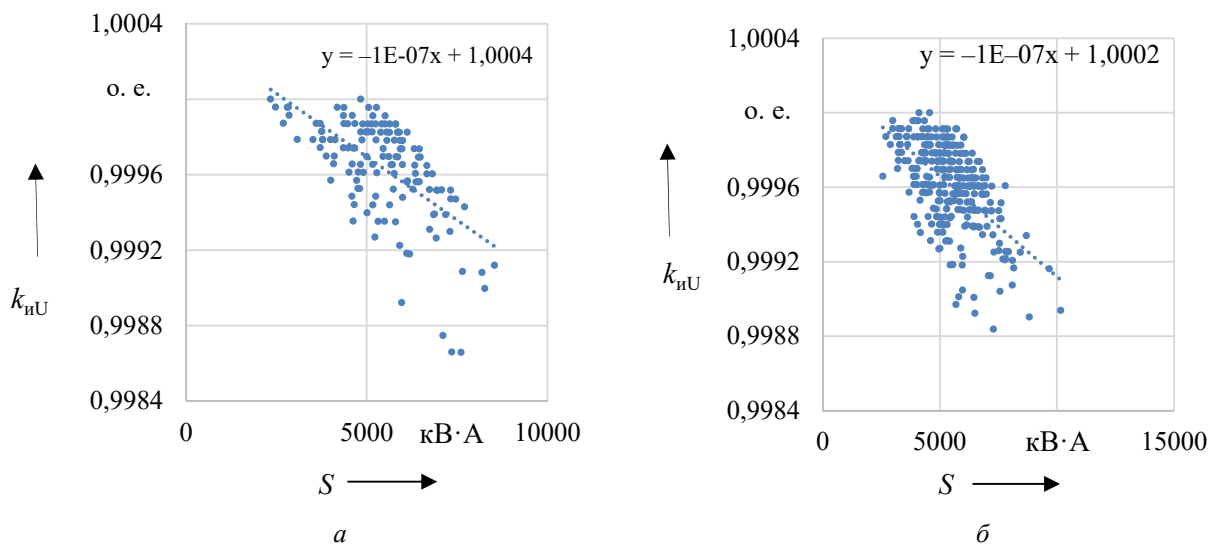


Рисунок 12 – Коэффициент искажения напряжения для шин 0,4 кВ ввода 1 (*a*) и ввода 2 (*б*)

Разработанная модель позволяет перейти к решению задач по оценке характеристик различных схем выпрямления на тяговых подстанциях, в том числе на основе инверторов и управляемых выпрямителей на различной элементной базе, оценить эффективность технических решений по сглаживанию выпрямленного напряжения и снижению несинусоидальности напряжений на шинах переменного тока, защите от перенапряжений, условиям работы полупроводниковых приборов в аварийных режимах. Предложенная модель позволяет перейти к имитационному моделированию процессов в системах тягового электроснабжения, в том числе с учетом работы устройств регулирования напряжения, режимов питания межподстанционных зон, схем питания и секционирования линий электропередач электроснабжения нетяговых потребителей (СЦБ) и продольного электроснабжения.

Выполнено при грантовой поддержке ОАО «РЖД» на подготовку выпускной квалификационной работы по теме «Повышение надежности электроснабжения постов микропроцессорной централизации».

Список литературы

1. Моделирование режимов электрических сетей, питающих тяговые подстанции постоянного тока / А. В. Крюков, К. В. Суслов, А. В. Черепанов, Нгуен Куок Хиеу. – Текст : непосредственный // Энергетик. – 2024. – № 2. – С. 9–13. – EDN ENWOEH.
2. 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. – EDN YXCETP.
3. Шевлюгин, М. В. Модель работы звена постоянного тока с накопителем энергии для повышения качества электрической энергии в сетях промышленного назначения / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына. – Текст : непосредственный // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 5. – С. 42–48. – EDN KANGMW.
4. 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. – EDN NFSKQJ.
5. Неугодников, Ю. П. Анализ энергетической эффективности работы выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций постоянного тока / Ю. П. Неугодников, И. П. Неугодников. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2021. – № 3 (70). – С. 104–108. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-104-108. – EDN ZFTOLP.
6. Павлова, Р. В. Оценка гармонических искажений тока и напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока / Р. В. Павлова, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Наука и образование: достижения и перспективы : материалы международной научно-практической конференции, Саратов, 19 декабря 2024 г. / Приволжский государственный университет путей сообщения. – Самара – Саратов : ООО «Амирит», 2024. – С. 85–92. – EDN MUZXWC.
7. Гречишников, В. А. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети за счёт выравнивания напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока /

В. А. Гречишников, И. В. Шаламай, С. П. Власов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 9. – С. 46–48. – EDN ZEP1WF.

8. Иванов, М. А. Предел передаваемой мощности в системе тягового электроснабжения / М. А. Иванов, В. В. Сероносов. – Текст : электронный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 2. – С. 64–74. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-02-64-74. – EDN EJHMAE.

9. Гателюк, О. В. Анализ данных измерений в системе тягового электроснабжения постоянного тока с неуправляемыми выпрямителями / О. В. Гателюк, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 66–72. – EDN YPSBOP.

References

1. Krykov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V., Nguyen Quoc Hieu. Modeling the modes of dc traction electrical networks. *Energetik – The power engineer*, 2024, no. 2, pp. 9-13. EDN ENWOEH. (In Russian).

2. 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. EDN YXCETP. (In Russian).

3. Shevlyugin M.V., Golitsyna A.E. Operation model of a DC and an energy storage part improving power quality in industrial frequency grids. *Energobezopasnost' i energosberezhenie – Energy security and energy saving*, 2022, no. 5, pp. 42-48. EDN KANGMW. (In Russian).

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

5. Neugodnikov Yu.P., Neugodnikov I.P. Energy efficiency analysis of operation of rectifying and inverter transformers for direct current traction substations. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2021, no. 3(70), pp. 104-108. DOI 10.20291/1815-9400-2021-3-104-108. EDN ZFTOLP. (In Russian).

6. Pavlova R.V., Nezevak V.L. [Assessment of harmonic distortions of current and voltage on the tires of DC traction substations]. *Nauka i obrazovanie: dostizheniia i perspektivy : materialy IKh mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Saratov, 19 dekabria 2024 goda* [Science and education: achievements and prospects : proceedings of the First International Scientific and Practical Conference, Saratov, December 19, 2024]. Samara-Saratov, Amirit Publ., 2024, pp. 85-92. EDN MUZXWC. (In Russian).

7. Grechishnikov, V. A., Shalamai, I. V., & Vlasov, S. P. (2017). Reducing electric-power losses in a traction network due to the voltage grading at the busbars of dc traction substations. *Russian Electrical Engineering*, 88(9), 592-594. DOI 10.3103/S1068371217090061. EDN XNRWXJ.

8. Ivanov M., Seronosov V. The limit of power flow in the traction power supply system. *Biulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy – Bulletin of scientific research result*, 2024, no. 2, pp. 64-74. DOI 10.20295/2223-9987-2024-02-64-74. EDN EJHMAE. (In Russian).

9. Gatelyuk, O. V., Nesevac, V. L., & Erbes, V. V. (2019). Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers. *Russian Electrical Engineering*, 90, 180-186. DOI 10.3103/S1068371219020032.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nezevakwl@mail.ru

Скоков Руслан Борисович

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: skokovrb@yandex.ru

Павлова Раиса Витальевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Студентка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (953) 869-53-13.

E-mail: raiskapavlova2003@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Применение имитационной модели тяговой подстанции постоянного тока для оценки качества электроэнергии / В. Л. Незевак, Р. Б. Скоков, Р. В. Павлова – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 36 – 48.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: nezevakwl@mail.ru

Skokov Ruslan Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department "Electric Power Supply of Railways", OSTU.

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

E-mail: skokovrb@yandex.ru

Pavlova Raisa Vitalievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Student of the department "Electric Power Supply of Railways", OSTU.

Phone: +7 (953) 869-53-13.

E-mail: raiskapavlova2003@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V.L., Skokov R.B., Pavlova R.V. Application the DC traction substation simulation model to assess the quality of electricity. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 36-48. (In Russian).

И. М. Попова, В. В. Карнакова

Саратовский филиал Приволжского государственного университета путей сообщения (ПривГУПС),
г. Саратов, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ПУТЕЙ НЕОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема модернизации железнодорожных путей необщего пользования посредством внедрения автоматизированных систем управления погрузочно-разгрузочными работами. Актуальность исследования обусловлена значительной долей путей необщего пользования в железнодорожной инфраструктуре России (29 % от общей протяженности путей сообщения) и их постоянным увеличением, растущими объемами промышленного производства на территории страны и необходимостью повышения эффективности транспортного обслуживания предприятий и повышения эффективности их использования. На путях необщего пользования начинают и заканчивают свое следование более 85 % всего грузопотока на железнодорожном транспорте. Правильность обслуживания, организация и технология работы рассматриваемых путей влияют на работу всей транспортной сети. Проблема исследования заключается в том, что традиционно принятые методы погрузочно-разгрузочных работ на путях необщего пользования не обеспечивают необходимую эффективность перевозочного процесса, что приводит к большим простоям подвижного состава и увеличению эксплуатационных расходов для железнодорожного транспорта.

В работе применены методы системного анализа, математического моделирования и сравнительного анализа статистических данных. На основе исследования международного опыта и отечественной практики показано, что внедрение автоматизированных систем управления способно сократить время простоя вагонов на 25 – 30 % и снизить эксплуатационные расходы на 15 – 20 %. В статье представлено определение автоматизированной системы управления погрузочно-разгрузочными работами как комплексной информационно-управляющей системы, интегрирующей аппаратные и программные средства. Разработана поэтапная методология внедрения системы, состоящая из семи последовательных этапов – от предварительного анализа до оптимизации и развития. Предложенные решения учитывают специфику российских условий эксплуатации и требования импортозамещения.

Ключевые слова: железнодорожные пути необщего пользования, автоматизированная система управления, погрузочно-разгрузочные работы, цифровизация транспорта, модернизация инфраструктуры, оптимизация процессов, информационные технологии, транспортная логистика, импортозамещение, промышленный железнодорожный транспорт.

Irina M. Popova, Victoria V. Karnakova

Saratov Transport College – Volga State Transport University Branch (STC – VSTU Branch),
Saratov, the Russian Federation

IMPROVING THE OPERATION OF NON-PUBLIC WAYS THROUGH THE USE OF MODERN INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract. The article discusses the urgent problem of upgrading non-public railway tracks through the introduction of automated loading and unloading control systems. The relevance of the study is due to the significant proportion of non-public tracks in the Russian railway infrastructure (29 % of the total length) and their constant increase, the growing volume of industrial production in the country and the need to improve the efficiency of transport services for enterprises and improve the efficiency of their use. More than 85 % of all freight traffic by rail starts and ends on non-public roads. The correctness of the service, organization and technology of the operation of the considered routes affects the operation of the entire transport network. The problem of the study lies in the fact that traditionally accepted methods of loading and unloading operations on non-public tracks do not provide the necessary efficiency of the transportation process, which leads to long downtime of rolling stock and increased operating costs for railway transport.

The methods of system analysis, mathematical modeling and comparative analysis of statistical data are used in the work. Based on a study of international experience and domestic practice, it has been shown that the introduction of automated control systems can reduce the downtime of wagons by 25 – 30 % and reduce operating costs by 15 – 20 %. The article presents the definition of an automated loading and unloading management system as an integrated information management system that integrates hardware and software. A step-by-step methodology for system

implementation has been developed, including seven consecutive stages from preliminary analysis to optimization and development. The proposed solutions take into account the specifics of Russian operating conditions and import substitution requirements.

Keywords: *non-public railway tracks, automated control system, loading and unloading operations, digitalization of transport, modernization of infrastructure, optimization of processes, information technology, transport logistics, import substitution, industrial railway transport.*

Актуальность научного исследования, посвященного совершенствованию работы путей необщего пользования за счет применения современных информационно-управляющих систем, обусловлена несколькими ключевыми факторами. В условиях постоянного роста объемов промышленного производства и грузоперевозок существенно возрастает нагрузка на железнодорожную инфраструктуру, включая пути необщего пользования, которые играют важную роль в обеспечении эффективного функционирования промышленных предприятий и логистических центров. Традиционные методы управления движением на путях необщего пользования зачастую не способны обеспечить необходимую эффективность и безопасность перевозочного процесса, что приводит к простоям подвижного состава, снижению наличной пропускной способности и увеличению эксплуатационных расходов. Внедрение современных информационно-управляющих систем позволяет решить эти проблемы путем автоматизации процессов управления движением, оптимизации маршрутизации, мониторинга технического состояния инфраструктуры и подвижного состава в режиме реального времени. Кроме того, цифровизация транспортной отрасли является одним из приоритетных направлений развития экономики, что делает исследования в области внедрения современных технологий управления на путях необщего пользования особенно востребованными. Актуальность темы исследования обусловлена также необходимостью повышения конкурентоспособности предприятий, имеющих собственные железнодорожные пути, путем снижения транспортных издержек и повышения качества транспортного обслуживания. В условиях современных требований к экологичности и безопасности перевозок внедрение информационно-управляющих систем способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и минимизации рисков возникновения нештатных ситуаций.

Цель исследования: предложить способ усовершенствования работы путей необщего пользования за счет применения современных информационно-управляющих систем. Задачи: проанализировать содержание термина «железные дороги необщего пользования»; раскрыть значение протяженности железнодорожных путей сообщения в период 2010 – 2023 гг.; при предложении мер усовершенствования работы путей необщего пользования учесть опыт Московского центрального кольца; раскрыть архитектуру многоуровневой системы интервального регулирования; предложить конкретные меры улучшения работы путей необщего пользования.

В первую очередь представляется необходимым проанализировать содержание термина «железные дороги необщего пользования». Опираясь на работы исследователей в области железнодорожного транспорта, можно выделить два основных подхода к определению железных дорог необщего пользования. Автор В. В. Космин рассматривает железные дороги необщего пользования как технологически взаимосвязанный комплекс железнодорожных путей, инженерных сооружений и технических устройств, принадлежащих предприятиям или организациям на правах собственности или ином законном основании, примыкающий к железнодорожным путям общего пользования и предназначенный для обслуживания определенных пользователей в части выполнения погрузочно-разгрузочных операций, временного хранения грузов и подвижного состава [3].

Исследователь Д. Д. Смирнов определяет железные дороги необщего пользования как специализированные транспортные объекты, являющиеся неотъемлемой частью производственно-технологического процесса промышленных предприятий, включающие в себя железнодорожные пути и обслуживающую их инфраструктуру, которые не входят в систему общего пользования и эксплуатируются в интересах конкретных хозяйствующих субъектов для

обеспечения их производственной деятельности, включая маневровую работу, погрузку-выгрузку и внутризаводские перевозки [8].

Синтезируя данные подходы и учитывая современные тенденции развития железнодорожного транспорта, можно предложить следующее авторское определение: железные дороги необщего пользования представляют собой технологически интегрированный инфраструктурный комплекс, включающий в себя железнодорожные пути, инженерные сооружения, системы управления движением и технические устройства, находящиеся в собственности или законном владении отдельных предприятий и организаций, примыкающий к путям общего пользования и функционирующий как составная часть производственно-логистической системы этих предприятий для выполнения специализированных транспортных операций, включая погрузку-выгрузку, маневровую работу, временное хранение грузов и подвижного состава, а также внутрипроизводственные перевозки.

Интерес представляет «Белая книга» холдинга «Российские железные дороги», в которой указано следующее [1].

В рамках реализации стратегических документов, определяющих вектор развития железнодорожной отрасли России на период до 2020 – 2030 гг., сформулирован комплекс приоритетных направлений модернизации транспортной системы. Ключевыми векторами развития выступают существенное наращивание транспортного потенциала: планируется увеличение грузооборота на 40 – 60 % и пассажиропотока на 20 – 40 %. Особое внимание уделяется устранению инфраструктурных ограничений на критически важных маршрутах и созданию масштабной сети современных транспортных коридоров, включающей в себя более 6,9 тыс. км скоростных и 4,3 тыс. км высокоскоростных магистралей.

Значительный акцент делается на качественных преобразованиях в сфере обслуживания клиентов и обеспечения безопасности перевозок. Планируется трехкратное увеличение объема транзитных грузоперевозок через территорию РФ при одновременном снижении экологической нагрузки – предполагается двукратное сокращение удельных выбросов углекислого газа на единицу транспортной работы.

Достижение поставленных целей предполагается через масштабное технологическое перевооружение отрасли, включающее в себя обновление подвижного состава, внедрение передовых цифровых решений и интеллектуальных систем управления транспортом, что в совокупности должно обеспечить значительный рост производительности труда в отрасли.

Факт, что пути необщего пользования нуждаются в технологической модернизации, как это происходит с путями общего пользования, подтверждается в результате анализа протяженности путей сообщения. Протяженность путей сообщения 2010 – 2023 гг. представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Протяженность путей сообщения в период 2010 – 2023 гг. [9, с. 33]

Наименование путей сообщения	Год				
	2010	2015	2019	2020	2023
Железнодорожные пути, в т. ч. (тыс. км):					
общего пользования	124	118	126	122	122
необщего пользования	86	86	87	87	87
	38	32	39	35	35

Статистические данные 2023 г., демонстрирующие соотношение протяженности путей необщего пользования (35 тыс. км) и путей общего пользования (87 тыс. км), наглядно свидетельствуют о значительной роли путей необщего пользования в транспортной инфраструктуре Российской Федерации. Тот факт, что протяженность путей необщего пользования составляет около 29 % от общей протяженности железнодорожной сети страны, указывает на их существенный вклад в обеспечение производственно-логистических процессов промышленных предприятий и транспортных узлов. Такое масштабное присутствие путей необщего пользования в транспортной системе страны обусловлено

исторически сложившейся структурой промышленности, где множество крупных предприятий имеет собственные железнодорожные подъездные пути для обеспечения производственных процессов. В современных условиях, когда пути общего пользования активно модернизируются с внедрением цифровых технологий, автоматизированных систем управления и современных средств сигнализации и связи, становится критически важным обеспечить соответствующий уровень технологического развития и путей необщего пользования. Их существенная доля в общей протяженности железнодорожной сети указывает на необходимость комплексного подхода к модернизации всей железнодорожной инфраструктуры страны, где пути необщего пользования должны развиваться синхронно с путями общего пользования для обеспечения эффективного взаимодействия всех элементов транспортной системы. Игнорирование технологического развития путей необщего пользования может привести к возникновению «узких» мест в логистических цепочках, снижению эффективности работы промышленных предприятий и, как следствие, к ухудшению экономических показателей целых отраслей промышленности. Поэтому технологическая модернизация путей необщего пользования, составляющих столь значительную часть железнодорожной инфраструктуры страны, является не просто желательной, а необходимой мерой для поддержания конкурентоспособности российской промышленности и обеспечения эффективной работы всего транспортного комплекса страны. Авторы данной статьи убеждены, что в настоящее время железнодорожные пути необщего пользования должны быть модернизированы посредством автоматических систем управления разгрузочно-погрузочными работами, что подтверждается мнением ряда исследователей.

В период 2018 – 2024 гг. вопрос автоматизации управления разгрузочно-погрузочными работами на железнодорожных путях необщего пользования приобрел особую актуальность, что подтверждается многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых. Согласно мнению А. Н. Рахмангулова и его коллег современное состояние путей необщего пользования характеризуется значительным износом инфраструктуры и недостаточной эффективностью управления погрузочно-разгрузочными операциями, что приводит к увеличению простоев вагонов и снижению общей производительности транспортно-логистических систем предприятий [4, с. 32 – 35].

В своей работе Д. А. Сергеев и его коллеги отмечают, что внедрение автоматизированных систем управления может сократить время простоя вагонов на 25 – 30 % и снизить эксплуатационные расходы на 15 – 20 % [7]. Исследования А. В. Озерова показывают, что современные автоматизированные системы, использующие технологии искусственного интеллекта и машинного обучения, способны оптимизировать маршруты движения погрузочно-разгрузочной техники, координировать работу различных подразделений и минимизировать влияние человеческого фактора на производственные процессы. Этот же автор полагает, что более 60 % путей необщего пользования в России нуждаются в модернизации систем управления погрузочно-разгрузочными работами [6]. В международной практике, как отмечает Б. Девриши, внедрение автоматизированных систем управления на железнодорожных путях необщего пользования позволило повысить производительность машин на 50 – 55 % и сократить количество нештатных ситуаций на 45 % [10].

Представляется необходимым раскрыть сущность автоматизированных систем управления погрузочно-разгрузочными работами. Автоматизированная система погрузочно-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте представляет собой комплексную информационно-управляющую систему, интегрирующую аппаратные и программные средства для оптимизации и контроля всех процессов, связанных с погрузкой и разгрузкой железнодорожных составов [5]. Данная система функционирует как составная часть общей информационно-управляющей инфраструктуры железнодорожного транспорта, что подтверждается ее тесной интеграцией с другими системами управления железнодорожными перевозками. В основе работы системы лежит принцип многоуровневой архитектуры, включающей сенсорный уровень (датчики, измерительные приборы, системы технического

рения), исполнительный уровень (погрузочно-разгрузочные механизмы, конвейерные системы), уровень оперативного управления (локальные контроллеры, программируемые логические контроллеры) и уровень стратегического управления (серверы, базы данных, автоматизированные рабочие места операторов). Система реализует ключевые принципы информационно-управляющих систем, такие как централизация управления, автоматизация рутинных операций, оптимизация ресурсов, обеспечение безопасности и надежности операций, масштабируемость и адаптивность к изменяющимся условиям работы.

Важной особенностью системы является ее способность к интеграции с существующими информационными системами железнодорожного транспорта, включая системы управления движением поездов, системы планирования перевозок и системы учета грузов. Система обеспечивает автоматизированное планирование погрузочно-разгрузочных работ с учетом текущего состояния подвижного состава, характеристик грузов, доступности погрузочно-разгрузочных механизмов и требований по безопасности. В режиме реального времени осуществляется мониторинг выполнения операций, контроль состояния оборудования, анализ эффективности работы и формирование отчетности. Как информационно-управляющая система она обеспечивает сбор, обработку и хранение данных о всех аспектах погрузочно-разгрузочных операций, позволяет осуществлять прогнозирование и оптимизацию процессов на основе накопленной статистики и применения методов машинного обучения. Система поддерживает различные режимы работы: автоматический, полуавтоматический и ручной, что обеспечивает гибкость управления и возможность быстрого реагирования на нестандартные ситуации.

Важным аспектом является реализация принципов предиктивной аналитики, позволяющей прогнозировать потенциальные проблемы и планировать профилактическое обслуживание оборудования. В системе реализованы механизмы отказоустойчивости и резервирования данных, что гарантирует непрерывность работы даже при возникновении технических сбоев. Как разновидность информационно-управляющей системы на железнодорожном транспорте она обеспечивает выполнение следующих ключевых функций: координации работы различных подразделений и служб, оптимизации использования ресурсов, контроля выполнения технологических операций, обеспечения безопасности работ, формирования аналитической отчетности для принятия управленческих решений. Система интегрируется с глобальными навигационными системами, системами идентификации грузов и подвижного состава, что позволяет обеспечить полный контроль за перемещением грузов и оптимизировать логистические процессы.

Таким образом, автоматизированная система погрузочно-разгрузочных работ является неотъемлемой частью современной информационно-управляющей инфраструктуры железнодорожного транспорта, обеспечивающей повышение эффективности, безопасности и качества выполнения погрузочно-разгрузочных операций.

Желая обосновать, что внедрение автоматизированных систем управления погрузочно-разгрузочными работами значительно повысит эффективность таких работ на путях необщего пользования, мы будем использовать методологию и формулы дисциплины «Комплексная механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных работ» [2, с. 70 – 80]. Так, для проведения наших расчетов будут использованы следующие формулы:

$$Q_{m\ netto} = m_{s\ mar} \cdot P_{st}, \quad (1)$$

где $Q_{m\ netto}$ – масса груза в маршруте;

$m_{s\ mar}$ – количество вагонов в составе маршрута (35 вагонов);

P_{st} – статическая нагрузка вагона (60 т).

В качестве примера возьмем 35 вагонов, статическая нагрузка каждого из которых составляет 60 т. При таких условиях получается, что $Q_{m\ netto} = 35 \cdot 60 = 2100$ т.

Вторым этапом рассчитываем необходимое количество погрузочно-разгрузочных машин (ПРМ) $N_{p/r}$ по формуле:

$$N_{p/r} = \frac{Q_{m\ netto}}{P \cdot (T_{per} - T_{post} - (k_{pou} \cdot t_{pou}) - (k_{уб} \cdot t_{уб})} \quad (2)$$

Для расчета используем следующие исходные данные: суточный грузооборот $Q_r = 2100$ т; производительность ПРМ $P = 32$ т/ч; время работы за сутки $T_{per} = 24$ ч; постоянные перерывы $T_{post} = 5$ ч; количество подач и уборок $k_{pou} = k_{уб} = 3$; время на подачу и уборку $t_{pou} = t_{уб} = 0,33$ ч. Сначала вычисляем эффективное время работы:

$$T_{eff} = 24 - 5 - (3 \cdot 0,33) - (3 \cdot 0,33) = 17,02 \text{ ч.}$$

Затем определяем количество ПРМ:

$$N_{p/r} = \frac{2100}{(32 \cdot 17,02)} \approx 3,857.$$

Округляя в большую сторону, получаем необходимое количество погрузчиков – четыре единицы.

Третьим этапом определяем норму времени на выполнение грузовых операций по формуле:

$$t_p = \frac{(Q_{m\ netto} \cdot 60)}{(N_{p/r} \cdot P)} + t_{п} \quad (3)$$

Используя ранее полученные значения массы груза $Q_{m\ netto} = 2100$ т, количество ПРМ $N_{p/r} = 4$, производительность $P = 32$ т/ч и время на подготовительные операции $t_{п} = 30$ мин, рассчитываем основное время:

$$t_{osn} = \frac{(2100 \cdot 60)}{(4 \cdot 32)} = 984,375 \text{ мин.}$$

Общее время грузовых операций t_r составит $984,375 + 30 = 1014,375$ мин.

Представляется необходимым сделать следующие пояснения к расчетам:

определение массы груза ($Q_{m\ netto}$): вычислили общий объем груза, который необходимо погрузить исходя из количества вагонов и их грузоподъемности;

расчет количества ПРМ ($N_{p/r}$): определили, сколько погрузчиков нужно задействовать, чтобы справиться с объемом работ в имеющееся рабочее время, учитывая перерывы и время на подачу/уборку вагонов;

расчет основного времени на грузовые операции (t_{osn}): вычислили, сколько времени займет непосредственная погрузка груза с учетом производительности всех ПРМ;

учет подготовительно-заключительных операций (t_{pz}): добавили время на подготовку оборудования, расстановку вагонов, проверку техники и другие необходимые операции перед началом и после завершения основной погрузки;

суммирование времени (t_r): получили общее время, необходимое для выполнения всех грузовых операций с маршрутом.

Таким образом, основное время на погрузку составляет примерно 984, 375 мин (около 16 ч 24 мин), а общее время с учетом подготовительно-заключительных операций – 1014, 375 мин (около 16 ч 54 мин). Представляется необходимым провести расчеты при условии, что будет использована автоматизированная система управления погрузочно-разгрузочными работами.

Предположим: $m_{s\ mar} = 35$ вагонов (типичный маршрут), $P_{st} = 60$ т (грузоподъемность вагона).

1. Расчет: $Q_{m\ netto} = 35 \cdot 60 = 2100$ т.

2. В условиях автоматизации: повышение производительности машин на 50 % (по примерным оценкам): $P = 32 \cdot 1,5 = 48$ т/ч; сокращение времени на подачу и уборку $t_{pou} = t_{уб} = 0,25$ ч; сокращение постоянных перерывов $T_{post} = 4$ ч.

Исходные данные: $Q_{m\ netto} = 2100$ т; $T_{per} = 24$ ч; $k_{pou} = t_{pou} = 3$; $P = 48$ т/ч.

Расчет эффективного времени работы: $T_{eff} = 24 - 4 - 3 \cdot 0,25 - 3 \cdot 0,25 = 18,5$ ч.

Расчет: $N_{p/r} = \frac{2100}{(48 \cdot 18,5)} \approx 2,364$, округляем до трех машин.

3. Расчет нормы времени на грузовые операции t_{osn} :

$$t_{osn} = \frac{Q_{m\ netto}}{N_{p/r} \cdot P} \cdot 60 + t_{п}. \quad (4)$$

В условиях автоматизации $tn = 15$ мин. Общая производительность всех машин: $3 \cdot 48 = 144$ т/ч. Время на основные операции: $\frac{2100}{144} \approx 14,5833$ ч = 875 мин. Общая норма времени: $t_{osn} = 875 + 15 = 890$ мин.

Представим приведенные выше данные в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Сравнение основных показателей погрузочно-разгрузочных работ железнодорожного транспорта на путях необщего пользования, полученных с использованием автоматизированной системы управления погрузочно-разгрузочными работами и без автоматизации.

Показатель	Без автоматизации	С автоматизацией	Изменение
Производительность машины (т/ч)	32	48	+16
Количество погрузочно-разгрузочных машин	4	3	-1
Общая производительность (т/ч)	128	144	+16
Время на основные операции (мин)	984,375	875	-109,375
Время на подготовительно-заключительные операции (мин)	30	15	-15
Общая норма времени (мин)	1014,375	890	-124,375

Наконец, представляется необходимым предложить, каким образом будет организовано внедрение таких автоматизированных систем на железнодорожных путях необщего пользования. Внедрение автоматизированной системы управления погрузочно-разгрузочными работами на железнодорожных путях необщего пользования в условиях российской действительности 2024 г. должно осуществляться поэтапно с учетом специфики каждого конкретного предприятия и включать в себя следующие основные этапы с соответствующими мерами.

Первый этап – предварительный анализ и подготовка, включающие в себя проведение комплексного обследования существующей инфраструктуры путей необщего пользования, оценку текущего состояния погрузочно-разгрузочного оборудования, анализ документооборота и бизнес-процессов, выявление «узких» мест в организации работ, определение необходимости модернизации или замены оборудования, формирование технического задания на разработку системы с учетом специфических требований предприятия. На этом этапе необходимо провести аудит существующих информационных

систем предприятия для определения возможностей интеграции, оценить квалификацию персонала и составить план обучения.

Второй этап – проектирование системы: разработка архитектуры системы с учетом импортозамещения и использования отечественных программно-аппаратных решений, определение необходимого оборудования и программного обеспечения, проектирование интерфейсов взаимодействия с существующими системами предприятия, разработка алгоритмов управления погрузочно-разгрузочными операциями, создание системы информационной безопасности. Важным аспектом является учет требований российского законодательства в области промышленной безопасности и защиты информации.

Третий этап – подготовка инфраструктуры, предполагающая модернизацию существующего оборудования или установку нового, монтаж систем видеонаблюдения и контроля, прокладку необходимых коммуникаций, установку датчиков и сенсоров, создание серверной инфраструктуры, организацию резервных каналов связи. На этом этапе особое внимание следует уделить обеспечению бесперебойной работы системы в различных климатических условиях, характерных для российских регионов.

Четвертый этап – разработка и тестирование программного обеспечения, включающие в себя создание специализированного программного обеспечения с учетом требований импортозамещения, разработку пользовательских интерфейсов, настройку алгоритмов управления, проведение модульного и интеграционного тестирования, отладку взаимодействия всех компонентов системы.

Пятый этап – пилотное внедрение, предусматривающее запуск системы в тестовом режиме на ограниченном участке путей необщего пользования, отработку всех технологических процессов, выявление и устранение недостатков, корректировку алгоритмов работы, обучение персонала работе с системой.

Шестой этап – полномасштабное внедрение – поэтапный перевод всех погрузочно-разгрузочных операций под управление автоматизированной системы, настройка взаимодействия с информационными системами холдинга «РЖД», организация технической поддержки, создание резервных копий данных и настройка системы резервирования.

Седьмой этап – оптимизация и развитие системы, предполагающие постоянный мониторинг работы системы, сбор и анализ статистических данных, оптимизацию алгоритмов управления, расширение функциональности системы, интеграцию с новыми технологиями и оборудованием.

На каждом этапе необходимо обеспечить строгий контроль качества выполняемых работ, соблюдение требований безопасности и защиты информации, а также регулярное взаимодействие с надзорными органами для своевременного получения необходимых согласований и разрешений. Особое внимание следует уделить обучению персонала и формированию культуры работы с автоматизированными системами, что является критически важным фактором успешного внедрения автоматизированных систем в российских условиях.

В результате проведенного исследования установлено, что модернизация технологической составляющей железнодорожных путей необщего пользования является критически важной задачей, что подтверждается их значительной долей в общей протяженности железнодорожной сети России (29 %, или 35 тыс. км из 87 тыс. км). Актуальность модернизации обусловлена необходимостью повышения эффективности работы промышленных предприятий, снижения простоев вагонов и оптимизации логистических процессов. Согласно исследованиям внедрение автоматизированных систем управления способно сократить время простоя вагонов на 25 – 30 % и снизить эксплуатационные расходы на 15 – 20 %. Автоматизированная система управления погрузочно-разгрузочными работами представляет собой комплексную информационно-управляющую систему, интегрирующую аппаратные и программные средства для оптимизации и контроля всех процессов, связанных с погрузкой и разгрузкой железнодорожных составов. Проведенный математический анализ показал, что для типового маршрута из 35 вагонов со статической нагрузкой 60 т (общая масса

груза 2100 т) внедрение автоматизированной системы позволяет оптимизировать количество необходимой погрузочно-разгрузочной техники и повысить эффективность ее использования. Процесс внедрения автоматизированной системы включает в себя семь последовательных этапов: предварительный анализ и подготовку, проектирование системы, подготовку инфраструктуры, разработку и тестирование программного обеспечения, пилотное внедрение, полномасштабное внедрение, оптимизацию и развитие системы. Каждый этап требует тщательного планирования и контроля качества выполняемых работ с учетом специфики российских условий эксплуатации и требований импортозамещения. Таким образом, внедрение автоматизированных систем управления погрузочно-разгрузочными работами на железнодорожных путях необщего пользования является необходимым условием повышения эффективности работы промышленных предприятий и транспортной системы страны в целом.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года («Белая книга») // [cipi.samgtu.ru](http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf) : сайт. – Текст : электронный. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения: 20.11.2024).
2. Колик, А. В. Грузовые перевозки: комбинированные технологии / А. В. Колик. – Москва : Юрайт, 2024. – 258 с. – Текст : непосредственный.
3. Космин, В. В. Новая российская железная дорога необщего пользования / В. В. Космин, А. А. Космина. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2024. – № 8. – С. 30–31. – EDN MIDGVS.
4. Математическое моделирование транспортных систем и процессов / А. Н. Рахмангулов, А. В. Цыганов, В. А. Пикалов, Д. С. Муравьев. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2021. – 190 с. – DOI 10.6084/m9.figshare.14609553. – EDN NNZULG.
5. Митроусов, Н. А. Анализ существующих методов автоматизации погрузочно-разгрузочных работ / Н. А. Митроусов. – Текст : непосредственный // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : сборник докладов 27-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ-МГСУ, Москва, 26–27 апреля 2023 года / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2023. – С. 268–270. – EDN VPIKXS.
6. Озеров, А. В. Перспективы повышения функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях цифровизации / А. В. Озеров. – Текст : непосредственный // Надежность. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 54–64. – EDN IDMTTQ.
7. Особенности управления инвестициями в основной капитал железнодорожных предприятий при внедрении цифровых технологий / Д. А. Сергеев, Д. В. Розов, И. С. Комаров [и др.]. – Текст : непосредственный // Цифровая трансформация общества: социально-экономические и технологические аспекты : материалы I международной научно-практической конференции, Тверь, 20 ноября 2023 года / Тверской государственный технический университет. – Тверь, 2024. – С. 47–55. – EDN OKTJLY.
8. Смирнов, Д. Д. Взаимодействие между промышленными предприятиями и железнодорожными путями необщего пользования / Д. Д. Смирнов – Текст : непосредственный // Наука и молодежь : проблемы, поиски, решения : труды всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 12–14 мая 2021 г. / Под общей редакцией Н. А. Козырева. – Выпуск 25. – Часть V. – Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 430–433. – EDN ONUCRI.

9. Транспорт в России. 2022 : Стат. сб. / Росстат. – Москва, 2022 – 101 с. – Текст : непосредственный.

10. Bharadwaj, Devrishi. (2020). Integrated Freight Terminal and Automated Freight Management System: A theoretical approach. *Transportation Research Procedia*. 48. 260-279. 10.1016/j.trpro.2020.08.021.

References

1. *Strategiia nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i perspektivu do 2030 goda (Belaia kniga)* [The strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and the future up to 2030 (White Paper)]. Available at: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (accessed 20.11.2024).

2. Kolik A.V. *Gruzovye perevozki: kombinirovannye tekhnologii* [Freight transportation: combined technologies]. Moscow, Yurait Publ., 2024, 258 p. (In Russian).

3. Kosmin V.V., Kosmina A.A. The new Russian non-public railway. *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2024, no. 8, pp. 30-31. EDN MIDGVS. (In Russian).

4. Rakhmangulov A. N., Tsyganov A.V., Pikalov V. A., Muravyev D.S. *Matematicheskoe modelirovanie transportnykh sistem i protsessov* [Mathematical modeling of transport systems and processes]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov Publ., 2021, 190 p. DOI 10.6084/m9.figshare.14609553. EDN NNZULG. (In Russian).

5. Mitrousov N.A. [Analysis of existing methods of automation of loading and unloading operations]. *Pod'emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye, putevye, meliorativnye mashiny i robototekhnicheskie komplekсы : sbornik dokladov 27-i Moskovskoi mezhdunarodnoi mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh, posviashchennoi 95-letiiu podgotovki inzhenerov-mekhanikov MISI-MGSU* [Lifting and transport, construction, road, track, land reclamation machines and robotic complexes. Collection of reports of the 27th Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates, postgraduates and Young scientists dedicated to the 95th anniversary of the training of mechanical engineers at MISI-MGSU]. Moscow, 2023, pp. 268-270. EDN VPIKXC. (In Russian).

6. Ozerov A.V. Prospects for improving the functional safety of railway automation and telemechanics systems in the context of digitalization. *Nadezhnost' – Dependability*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 54-64. EDN IDMTTQ. (In Russian).

7. Sergeev D.A., Rozov D.V., Komarov I.S., Konovalov A.I., Dmitriev S.V. [Investment structure in the fixed capital of railway enterprises during the implementation of digital technologies]. *Tsifrovaia transformatsiia obshchestva: sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnologicheskie aspekty : materialy I mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Digital transformation of society: socio-economic and technological aspects : proceedings of the First International Scientific and Practical Conference]. Tver, 2024, pp. 47-55. EDN OKTJLY. (In Russian).

8. Smirnov D.D. [Interaction between industrial enterprises and non-public railway tracks]. *Nauka i molodezh' : problemy, poiski, resheniia : trudy vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Novokuznetsk, 12–14 maia 2021 g.* [Science and Youth : problems, searches, solutions : proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Novokuznetsk, May 12-14, 2021]. Novokuznetsk, 2021, pp. 430-433. EDN WEQPFY. (In Russian).

9. *Transport v Rossii. 2022: Statisticheskii sbornik/Rosstat* [Transport in Russia. 2022: Statistical Collection/Rosstat]. Moscow, 2022, 101 p. (In Russian).

10. Bharadwaj, Devrishi. (2020). Integrated Freight Terminal and Automated Freight Management System: A theoretical approach. *Transportation Research Procedia*. 48. 260-279. 10.1016/j.trpro.2020.08.021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Ирина Михайловна

Саратовский филиал Приволжского государственного университета путей сообщения (ПривГУПС). Астраханская ул., д. 1а, г. Саратов, 410004, Российская Федерация.

Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Инженерные, гуманитарные, естественнонаучные и общепрофессиональные дисциплины», ПривГУПС.

Тел.: +7 (905) 984-39-82.

E-mail: improva@mail.ru

Карнакова Виктория Владимировна

Саратовский филиал Приволжского государственного университета путей сообщения (ПривГУПС). Астраханская ул., д. 1а, г. Саратов, 410004, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Инженерные, гуманитарные, естественнонаучные и общепрофессиональные дисциплины», ПривГУПС.

Тел.: +7 (937) 020-95-58.

E-mail: vika.ice@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Попова, И. М. Совершенствование работы путей необщего пользования за счет применения современных информационно-управляющих систем / И. М. Попова, В. В. Карнакова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 49 – 59.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Popova Irina Mikhailovna

Saratov Transport College – Volga State Transport University Branch (STC – VSTU Branch) 1a, Astrakhan st., Saratov, 410004, the Russian Federation.

Ph.D. in Economics, associate professor of the department «Engineering, Humanities, Natural Sciences and General Professional Disciplines», PrivGUPS.

Phone: +7 (905) 984-39-82.

E-mail: improva@mail.ru

Karnakova Victoria Vladimirovna

Saratov Transport College – Volga State Transport University Branch (STC – VSTU Branch) 1a, Astrakhan st., Saratov, 410004, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Engineering, Humanities, Natural Sciences and General Professional Disciplines», PrivGUPS.

Phone: +7 (937) 020-95-58.

E-mail: vika.ice@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Popova I.M., Karnakova V.V. Improving the operation of non-public ways through the use of modern information management systems. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 49-59. (In Russian).

УДК 656.21:004.942

В. Г. Козлов

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРУДНЕНИЙ В РАБОТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Аннотация. Предложен новый подход к моделированию работы железнодорожных станций и узлов с использованием сетей Петри. Этот метод позволяет проводить анализ процессов как аналитически, так и посредством моделирования, учитывая топологические особенности, технологию работы станции и структуру транспортного потока. В статье подробно рассматриваются ключевые свойства сетей Петри, такие как ограниченность, живость и достижимость, а также методы их анализа. Эти свойства используются для решения практических задач, включая оптимизацию ресурсов, повышение эффективности эксплуатации и обеспечение безопасности работы железнодорожных станций. Предложенная модель позволяет выявить «узкие» места, прогнозировать возможные эксплуатационные затруднения и разрабатывать мероприятия для улучшения работы железнодорожной станции. В статье рассматриваются различные модификации сетей Петри, включая временные, стохастические и цветные сети. Каждая из них имеет свои преимущества для анализа временных, случайных и структурных характеристик и параметров топологии станции и пропускаемого транспортного потока. Приведен пример модели горловины парка приема железнодорожной станции по пропуску поездов, включая ее дерево достижимости возможных состояний. На основании анализа дерева достижимости определены эксплуатационные затруднения и последовательности событий, приводящие к этим состояниям. Модель предоставляет также возможность прогнозировать потенциальные эксплуатационные затруднения и нехватку маневровых ресурсов с использованием аналитичес-

кого метода, основанного на матричном анализе сети Петри. Такой подход позволяет для больших систем, таких как крупная техническая железнодорожная станция или узел, без необходимости полного моделирования всех состояний выявлять отдельные критические состояния, которые могут привести к нежелательным событиям.

Ключевые слова: железнодорожная станция, транспортный поток, перевозочный процесс, эксплуатационные затруднения, сети Петри.

Vladimir G. Kozlov

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

PREDICTING OPERATIONAL CONSTRAINTS IN RAILWAY STATION PERFORMANCE BASED ON MODELING WITH PETRI NETS

Abstract. *A new approach to modeling the operations of railway stations and junctions using Petri nets is proposed. This method enables process analysis both analytically and through simulation, considering the topological features, operational technology of the station, and the structure of the transportation flow. The article provides a detailed examination of key properties of Petri nets, such as boundedness, liveness, and reachability, as well as methods for their analysis. These properties are applied to solve practical tasks, including resource optimization, increasing operational efficiency, and ensuring railway station safety. The proposed model identifies bottlenecks, forecasts potential operational difficulties, and develops measures to improve station performance. Various modifications of Petri nets, including timed, stochastic, and colored nets, are discussed. Each type offers distinct advantages for analyzing the temporal, probabilistic, and structural characteristics and parameters of station topology and transportation flow. The paper presents a model of the throat of a railway station's reception yard for train passage, including its reachability tree of possible states. Analyzing the reachability tree identifies operational constraints and the sequences of events leading to these states. The model also predicts potential operational difficulties and shortages of maneuvering resources by applying an analytical method based on Petri net matrix analysis. This approach enables large systems, such as complex technical railway stations or junctions, to determine individual critical states that could lead to undesirable events without simulating all possible states.*

Keywords: railway station, transportation flow, transportation process, operational constraints, Petri nets.

Железнодорожный транспорт является сложной динамической системой, которая состоит из множества отдельных функционирующих подсистем с общей целью организации и пропуска транспортного потока по направлениям железнодорожной сети. Одной из ключевых составляющих этой системы является железнодорожная станция, где производится основная эксплуатационная работа по организации, переработке и пропуску транспортного потока. Моделирование процессов железнодорожной станции играет важную роль в понимании ее работы, оптимизации маневровых ресурсов, определении наличной пропускной и перерабатывающей способности. Глубокое понимание работы всех подсистем станции помогает принимать обоснованные решения по управлению ресурсами, сокращать время выполнения производственных операций, снижать риски сбоев и обеспечивать безопасность перевозок. Таким образом, моделирование становится незаменимым инструментом для улучшения работы станции и повышения эффективности всего железнодорожного транспорта. Исходя из этого цель исследования заключается в повышении эффективности перевозочного процесса железнодорожного транспорта путем моделирования работы железнодорожной станции на основе сетей Петри, что обеспечивает детальный анализ ее процессов и позволяет прогнозировать возможные эксплуатационные затруднения.

Существующая методология исследования процессов работы железнодорожных станций включает в себя несколько основных подходов и методов моделирования:

а) **графический метод**, основанный на разработке графического диаграммного представления работы железнодорожной станции, позволяющего визуализировать структуру и взаимодействие подсистем станции. Основными недостатками метода являются невозможность корректного отображения стохастических процессов и невысокая точность моделирования;

б) **аналитический детерминированный метод** основан на расчете различных

параметров работы железнодорожной станции с использованием детерминированных закономерностей. Аналитический детерминированный метод позволяет получить быстрые результаты, но его применимость ограничена, так как не учитываются случайные процессы;

в) **метод систем массового обслуживания** позволяет учитывать влияние случайных процессов на работу станций и величину межоперационных простоев. Он основан на теории массового обслуживания и может быть использован для анализа пропускной способности, эффективности и оптимизации работы станций. Однако этот метод имеет ограничения в адекватном отображении внутренней структуры и управлении станцией;

г) **имитационное моделирование**. Данный метод представляет собой воспроизведение технологического процесса с использованием вычислительной техники. Он позволяет детально отобразить все основные свойства транспортных систем и учитывать случайные процессы. Имитационное моделирование характеризуется высокими гибкостью и точностью, что делает его эффективным инструментом при анализе работы железнодорожной станции.

Выбор конкретного метода зависит от целей и требований исследования. Комбинирование различных методов может быть полезным для более полного и точного анализа работы железнодорожных станций.

В мировой практике, с учетом развития информационных технологий, имитационное моделирование является приоритетным методом исследования сложных систем. Имитационное моделирование процессов работы железнодорожной станции позволяет автоматически определить необходимые значения параметров эксплуатационной работы, меняя при этом различные условия перевозочного процесса и случайные события, учет которых при аналитических подходах вызывает существенные затруднения. Это позволяет оперативно учитывать все изменения в сложной системе и получить более точные значения оптимальных параметров функционирования. В настоящее время в области расчета железнодорожных станций, участков и транспортных узлов методом имитационного моделирования в отечественной науке и практике существует множество разработок [1 – 6, 8 – 9]. Большой вклад в развитие данного направления исследований внесли Бородин А. Ф., Козлов П. А., Казаков Н. Н., Негрей В. Я., Некрашевич В. И., Осьминин А. Т., Мишкурин П. Н., Пазойский Ю. О., Шевченко Д. Н. и др.

Для исследования транспортных процессов, в частности, учеными Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова и Иркутского государственного университета путей сообщения предлагается применение агентного моделирования, которое предполагает использование специальных активных объектов – агентов, обладающих атрибутами и связями [2]. Выделены три основных типа агентов: поезд, станция, оперативное управление. Они связаны и взаимодействуют как между собой, так и с внешними факторами. На основе технологического процесса работы станции для каждого агента выделена группа основных операций. Данная модель позволяет определить проблемные места в технологическом процессе работы станции и дает возможность выработать мероприятия по улучшению показателей ее работы.

В имитационных моделях, предложенных учеными Российского университета транспорта (МИИТа), для описания работы железнодорожной станции используется подход, основанный на применении сетевого потокового моделирования. Данная модель позволяет производить анализ и оценку вариантов развития железнодорожных узлов и направлений в разных эксплуатационных условиях, а также выработать технологические мероприятия по улучшению их работы.

Для моделирования работы железнодорожной станции предлагается также применение функциональной эргатической модели, где станция рассматривается как сложная система массового обслуживания, состоящая из множества элементов, которые в процессе работы тесно взаимодействуют, оказывая взаимное влияние друг на друга. Функциональные модели могут использоваться для получения технико-экономической оценки различных мероприятий, направленных на совершенствование технологии работы станции.

В данной статье впервые предлагается использовать метод моделирования, основанный на использовании сетей Петри. В отличие от указанных выше подходов данный метод позволяет исследовать процессы сложных систем как непосредственным моделированием процессов, так и аналитическим расчетом. Например, с использованием модели можно производить анализ топологии схемы железнодорожной станции и определять потенциальные «узкие» места. При этом сеть Петри можно представить в виде матрицы и аналитическим методом производить расчет по определению затруднений без трудоемкого моделирования всех возможных состояний модели.

Необходимо отметить, что существует множество исследований и работ по применению сетей Петри в решении транспортных задач, в том числе и на железнодорожном транспорте. Однако все исследования направлены на решение сетевых задач, где в качестве системы выступает транспорт в целом, а элементами (вершинами сети Петри) являются железнодорожные станции, узлы или подсистемы.

В трудах зарубежных ученых тоже рассматриваются вопросы применения сетей Петри для решения задач, связанных с железнодорожным транспортом. В частности, в работе Jack Litherland и Nikola Bešinović [10] предлагается использовать гибридные сети Петри для моделирования работы железнодорожной станции. Это позволяет проводить комбинированный анализ, учитывая как дискретные, так и непрерывные состояния и события. Однако предложенная модель имеет ограничения ее применения, на что указано авторами в статье. При моделировании процессов не рассматриваются нарушения, которые могут повлиять на работу железнодорожной станции. Предложенный метод направлен только на анализ пропуска пассажиропотока через платформу железнодорожной станции, не учитывается ограниченность инфраструктурных и маневровых ресурсов. Таким образом, предложенный подход эффективен для оценки пропускной способности станции и анализа пассажиропотока, но не охватывает все аспекты, необходимые для комплексного моделирования работы железнодорожной станции и прогнозирования эксплуатационных затруднений.

В данной работе автором железнодорожная станция рассматривается как отдельный объект исследования, а ее элементы – путь, парк, горловина и другие элементы и ресурсы – являются вершинами и метками сети Петри. Модель железнодорожной станции в виде сети Петри позволяет исследовать и оценивать ее топологию, технологию и бизнес-процессы эксплуатационной работы.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин двух типов – позиций и переходов, соединенных между собой дугами. Вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети. Для моделирования процессов работы железнодорожной станции в качестве позиций и переходов выступают элементы станции и процессы, а метками обозначается транспортная нагрузка (поток), которая может отличаться исходными входными параметрами (цветом метки) [7].

Существует ряд разновидностей сетей Петри, которые позволяют расширить возможности модели и ее анализа.

Временные сети Петри расширяют классическую модель, вводя понятие времени и длительности переходов. Каждому переходу назначается определенное время активации, и его выполнение возможно только по истечении этого интервала. Временные сети Петри позволяют моделировать и анализировать системы с временными ограничениями и процессами, зависящими от времени, такие как протоколы сетевого взаимодействия и управление ресурсами.

Стохастические сети Петри используются для моделирования систем, в которых время и вероятностные факторы играют важную роль. Этот тип сетей Петри позволяет учесть случайность в активации переходов, поскольку каждому переходу присваивается вероятность активации, а моделирование проводится с использованием стохастических процессов. Стохастические сети Петри находят применение в моделировании и анализе систем, где

случайные события и временные задержки играют важную роль, например, в телекоммуникационных сетях и процессах массового обслуживания.

Цветные сети Петри расширяют базовую модель, вводя понятие цвета для маркировок. Цвета представляют собой дополнительную информацию о состоянии системы. Они могут использоваться для моделирования и анализа систем с множественными типами ресурсов, различными состояниями объектов или другими дополнительными характеристиками. Цветные сети Петри широко применяются в моделировании и анализе сложных систем, таких как параллельные и распределенные вычисления, протоколы связи и производственные системы.

Каждый из указанных типов сетей Петри предоставляет расширенные возможности моделирования и анализа для различных классов систем, позволяя учесть временные, стохастические или дополнительные характеристики системы. Использование подходящего типа сетей Петри зависит от специфики моделируемой системы и целей исследования. При этом все эти разновидности могут быть сведены к базовой сети Петри, что позволяет проводить анализ на основе только ее свойств:

Ограниченность: сети Петри характеризуются конечным числом состояний и ограниченным числом ресурсов, что позволяет анализировать и управлять системами с ограниченными ресурсами, такими как маневровые ресурсы или количество путей в парке станции. Сети Петри позволяют анализировать использование ресурсов в системе и оптимизировать их распределение. Это может помочь в повышении эффективности системы и улучшении ее производительности.

Живость: подразумевается, что каждый переход может быть активирован бесконечное количество раз при выполнении определенных условий. Определение живости сети помогает в оценке поведения системы и ее способности достичь определенных состояний. Например, если сеть Петри не является живой, это может указывать на «узкие» места в эксплуатационной работе железнодорожной станции, где возникают задержки или нехватка ресурсов. При наличии таких проблем можно принять меры для устранения причин и улучшения эффективности станции.

Достижимость: определение достижимости позволяет установить, может ли система достичь определенного состояния или цели из начальной маркировки. Это важно для проверки корректности системы и выявления возможных проблем или затруднений.

Анализ свойств сетей Петри играет ключевую роль в моделировании, анализе и оптимизации различных систем, позволяя исследователям получить глубокое понимание поведения системы и контроль над ним. Одним из основных методов анализа является построение дерева достижимости, которое представляет собой структуру данных, отображающую все состояния, которые могут быть достигнуты из начального состояния сети Петри. Дерево достижимости является графом, в котором каждый узел соответствует одному состоянию сети, а ребра связывают состояния и указывают на событие, которое привело к переходу между данными состояниями.

На рисунке 1 представлена сеть Петри, используемая для моделирования работы горловины железнодорожной станции Калинковичи по приему и отправлению поездов. Вершины этой сети Петри представляют собой различные состояния системы, которые характеризуют конкретные ситуации на станции. Например, одна вершина может соответствовать состоянию, при котором на станцию прибывает поезд и занимает горловину, а другая – состоянию, в котором поезд отправляется и освобождает горловину станции. В приведенной модели вершины P3, P7, P14 и P17 в исходном состоянии помечены метками, что позволяет моделировать занятость и свободу элементов горловины. Каждая вершина соединена с другими вершинами при помощи переходов, которые моделируют события, изменяющие состояние системы. Если в процессе работы в указанных вершинах находится метка, это свидетельствует о свободе соответствующего элемента, и наоборот, если метка отсутствует, элемент считается занятым. Важно отметить, что количество таких переходов и

их комбинаций может быть весьма многочисленным, что позволяет более детально анализировать работу рассматриваемой системы и способствует выявлению возможных эксплуатационных затруднений.

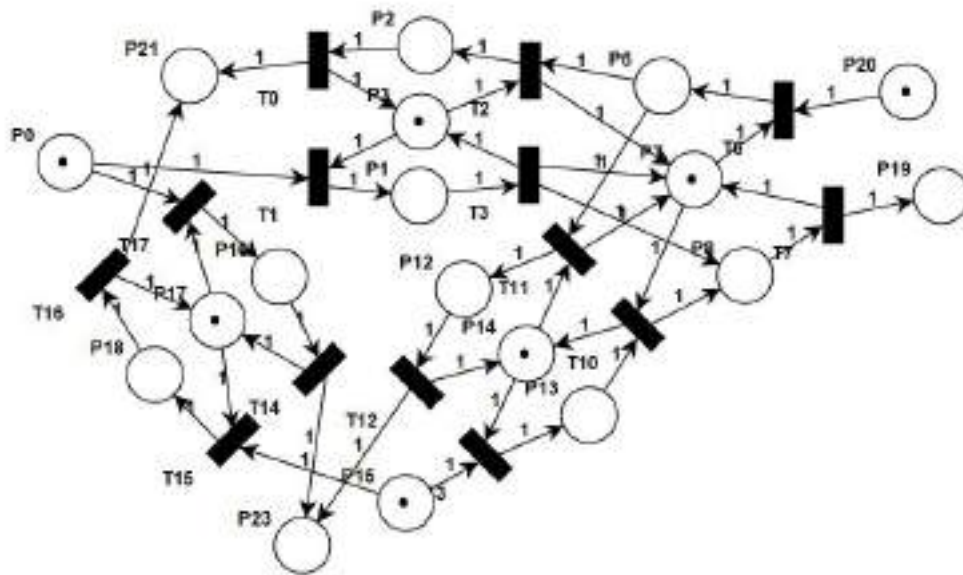


Рисунок 1 – Модель работы горловины железнодорожной станции Калинковичи по приему и отправлению поездов

На основе данной модели формируется дерево достижимости, которое описывает множество всех достижимых состояний рассматриваемой модели (рисунок 2). Например, при приеме двух и отправлении одного поезда со станции дерево достижимости состоит из 341 вершины, что отражает все возможные состояния системы. Количество различных переходов, приводящих к указанным состояниям, составляет 789.

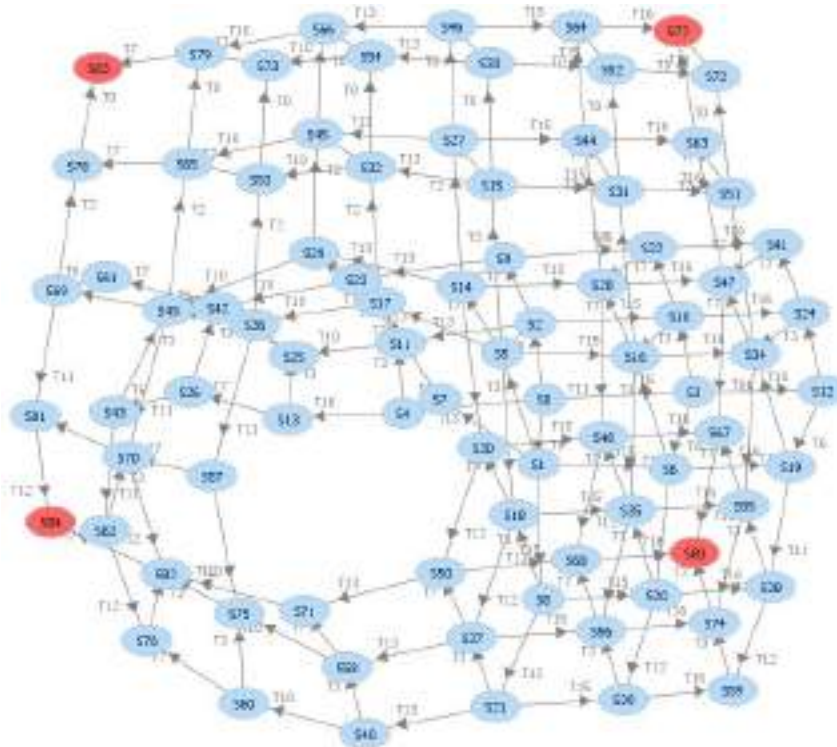


Рисунок 2 – Фрагмент дерева достижимости модели работы горловины железнодорожной станции Калинковичи по приему и отправлению поездов

Анализ дерева достижимости позволяет определить как состояние, так и последовательность переходов, которые должны сработать, чтобы привести к данному состоянию. Если вершины дерева не имеют выходной дуги, то процесс в исследуемой модели остановился, что означает возможные эксплуатационные затруднения в приеме или отправлении поездов со станции. Например, на рисунке 2 состояния S77, S80, S83 и S84 указывают на то, что процесс моделирования работы системы (горловины) остановился, а анализ переходов показывает ряд событий, которые привели к данным состояниям.

Необходимо отметить, что при рассмотрении крупной технической железнодорожной станции или узла размер дерева достижимости будет значительный, что затруднит его анализ. Для этого модель лучше представить в виде иерархической сети Петри, а для анализа использовать матричный метод, который позволяет аналитическим расчетом определить возможность существования конкретного состояния без трудоемкого процесса прямого моделирования всех возможных состояний системы.

Анализ сети Петри матричным методом сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\mu' = \mu_0 + x \cdot D, \quad (1)$$

где μ' – возможная достижимая разметка сети Петри; μ_0 – начальная разметка сети Петри (состояние системы); x – целочисленный неотрицательный вектор; D – матрица инцидентности, которая отражает связи между позициями и переходами.

Для определения возможности достижения рассматриваемой моделью (см. рисунок 1) разметки $\mu' = \{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0\}$, которая соответствует эксплуатационному затруднению при одновременном приеме и отправлении поездов через горловину станции, составляется система уравнений (2).

Решив систему уравнений, мы получаем конкретные значения для переменных состояний, что позволяет анализировать свойства сети Петри и найти достижимые состояния. Например, решением системы уравнений (2) является $X = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0\}$, что подтверждает возможность достижения указанной разметки модели и, соответственно, появления искомого эксплуатационного события в горловине станции. Значения найденных корней уравнений указывают на количество срабатываний переходов (T1, T6) для достижения разметки μ' .

		T0 T1 T10 T11 T12 T13 T14 T15 T16 T17 T2 T3 T6 T7																
P0	0	1	x_0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
P1	1	0	x_1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
P12	0	0	x_2	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P13	0	0	x_3	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P14	1	1	x_4	0	0	1	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P15	1	1	x_5	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
P16	0	0	x_6	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0
P17	1	1	x_7	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	-1	0	0	0	0	0
P18	0	0	x_8	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
P19	0	0	x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
P2	0	0	x_{10}	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P20	0	1	x_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
P21	0	0	x_{12}	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P23	0	0	x_{13}	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	1	x_{14}	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
P6	1	0	x_{15}	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0
P7	0	1	x_{16}	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	1	1
P8	0	0	x_{17}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	-1

Для более подробного описания эксплуатационной работы станций с учетом временных норм выполнения различных операций и особенностей транспортного потока предлагается

применить метод временной раскрашенной сети Петри. В такой модели переходы имеют связанные с ними временные затраты, что делает ее более приближенной к реальным условиям функционирования системы. Кроме того, метки могут иметь различные параметры, которые учитываются при активации переходов между состояниями модели. Важно отметить, что временную раскрашенную сеть можно упростить до обычной сети Петри с однородными метками, что позволяет анализировать ее структуру, основываясь только на ее свойствах.

Предложенный подход для моделирования эксплуатационной работы железнодорожных станций и узлов с использованием сетей Петри является эффективным инструментом для анализа и оптимизации перевозочного процесса. Этот метод может быть использован как в оперативной работе, так и на стадии проектирования станций. Применение данного подхода в оперативной работе позволяет моделировать эксплуатационные ситуации (изменение размера и структуры потока, закрытие пути, ограничение маневровых ресурсов и т. п.), а также производить анализ нежелательных или желательных свойств сетей Петри (ограниченность, безопасность, сохраняемость, живость и др.) для определения «узких» мест в эксплуатационной работе. На стадии проектирования сети Петри используются для анализа топологии элементов железнодорожной станции или узла с целью определения рациональной схемы, исключающей возможные технологические затруднения в их последующей эксплуатации. Предложенный подход обеспечивает более высокую точность оценки перевозочного потенциала крупных железнодорожных станций по сравнению с аналитическими методами расчета, а также снижает временные затраты при применении матричного метода анализа сети Петри для определения возможных эксплуатационных затруднений.

Список литературы

1. Козлов, П. А. Об имитационном моделировании и имитационных системах / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Е. В. Копылова. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 3–6. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6. – EDN JQIXUD.
2. Мишкурин, П. Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции / П. Н. Мишкурин, А. Н. Рахмангулов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 29–40. – DOI 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40. – EDN OTKKLC.
3. Козлов, П. А. Макромоделирование железнодорожных станций и узлов / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, И. Г. Слободянюк. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 82–88. – EDN TWBJHV.
4. Опыт применения в прикладных разработках и пути развития системы имитационного моделирования железнодорожных узлов и направлений / А. Ф. Бородин, К. Ю. Николаев, Е. О. Дмитриев [и др.]. – Текст : непосредственный // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2023. – № 8-1. – С. 14–34. – EDN ONCZOS.
5. Жарков, М. Л. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания / М. Л. Жарков, М. М. Павидис. – Текст : непосредственный // Надежность. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 27–34. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34. – EDN WUMLMA.
6. Кузнецов, С. К. Применение сетей Петри для моделирования железнодорожных систем (обзор) / С. К. Кузнецов, А. И. Потехин. – Текст : непосредственный // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва, 2014. – С. 4937–4946. – EDN SSIXJN.
7. Козлов, В. Г. Моделирование транспортных потоков и эксплуатационной работы железнодорожных станций и узлов на основе сетей Петри / В. Г. Козлов. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 114–116. – EDN DGBANF.

8. Негрей, В. Я. Перспективы использования цифровых технологий на сортировочных станциях / В. Я. Негрей, В. В. Бурченков. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018) : труды седьмой научно-технической конференции, Москва, 14 ноября 2018 года / Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». – Москва, 2018. – С. 153–154. – EDN YWHGEH.

9. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания / М. Л. Жарков, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский, М. М. Пavidис. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (51). – С. 4–14. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-4-14. – EDN JFIBUC.

10. Kaakai, F., Hayat, S., & El Moudni, A. (2006). Simulation of railway stations based on hybrid Petri nets. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(5), 50-55. DOI 10.3182/20060607-3-IT-3902.00013.

References

1. Kozlov P.A., Kolokolnikov V.S., Kopylova E.V. About simulation modeling and simulation systems. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2019, no. 1 (60), pp. 3-6. DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6. EDN JQIXUD. (In Russian).

2. Mishkurov P.N., Rakhmangulov A.N. Construction features of railway station agent-based simulation model. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii – Modern problems of Russian transport complex*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 29-40. DOI 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40. EDN OTKKLC. (In Russian).

3. Kozlov P.A., Tushin N.A., Slobodyanyuk I.G. Macromodeling of Railway Stations and Hubs. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology in Transport*, 2015, no. 2, pp. 82-88. EDN TWBJHV. (In Russian).

4. Borodin A.F., Nikolaev K.Yu., Dmitriev E.O., Sugorovsky A.V., Petrov A.S., Sukhov A.A. Experience in the use of simulation modeling system for railway junctions and directions in application development and development trends. *Biulleten' uchenogo soveta AO «IERT» – Bulletin of the academic council of JSC "Institute of economics and transport development"*, 2023, no. 8-1, pp. 14-34. EDN ONCZOS. (In Russian).

5. Zharkov M.L., Pavidis M.M. Modeling of railway network classification yards using queuing theory methods. *Nadezhnost' – Dependability*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 27-34. DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34. EDN WUMLMA. (In Russian).

6. Kuznetsov S.K., Potekhin A.I. [Application of Petri nets for modeling railway systems (review)]. *XII vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia VSPU-2014, Moskva, 16–19 iulia 2014 goda (XII All-Russian Meeting on Management Issues of VSPU-2014, Moscow, July 16–19, 2014)*. Moscow, 2014, pp. 4937-4946. EDN SSIXJN. (In Russian).

7. Kozlov V.G. Simulation of operational work railway stations and nodes based on Petri nets. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2022, no. 2 (45), pp. 114-116. EDN DGBANF. (In Russian).

8. Negrey V.Ya., Burchenkov V.V. Prospects for the use of digital technologies at classification yards. *Intellektual'nye sistemy upravleniia na zheleznodorozhnom transporte. Komp'iuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2018) : trudy sed'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Moskva, 14 noiabria 2018 goda (Intelligent control systems in railway transport. Computer and Mathematical Modeling (ISMST-2018) : Proceedings of the seventh Scientific and Technical Conference, Moscow, November 14, 2018)*. Moscow, 2018, pp. 153-154. EDN YWHGEH. (In Russian).

9. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Suprunovsky A.V., Pavidis M.M. Simulation of the world's largest railway marshalling yard using queuing theory. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo*

universiteta putei soobshcheniia – Herald of the Ural State University of Railway Transport, 2021, no. 3 (51), pp. 4-14. DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-4-14. EDN JFIBUC. (In Russian).

10. Kaakai, F., Hayat, S., & El Moudni, A. (2006). Simulation of railway stations based on hybrid Petri nets. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(5), 50-55. DOI 10.3182/20060607-3-IT-3902.00013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Козлов Владимир Геннадьевич

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

Кирова ул., д. 34, г. Гомель, 246050, Республика Беларусь.

Заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой и охрана труда».

Тел.: +375 (232) 95-21-84.

E-mail: vgkozlov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kozlov Vladimir Gennadyevich

Belarusian State University of Transport (BelSUT).

34, Kirova st., Gomel, 246050, Republic of Belarus.

Head of the department of "Operational management and occupational safety", BelSUT.

Phone: +375 (232) 95-21-84.

E-mail: vgkozlov@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Козлов, В. Г. Прогнозирование эксплуатационных затруднений в работе железнодорожной станции на основе моделирования с использованием сетей Петри / В. Г. Козлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 59 – 68.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kozlov V.G. Predicting operational constraints in railway station performance based on modeling with Petri nets. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. X (XX), pp. 59-68. (In Russian).

УДК 656.073.235

Н. А. Кекиш, В. Г. Пищик

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

СОГЛАСОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ И НАБОРОВ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ СОЗДАНИИ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРОВ НА ТЕРМИНАЛЕ

Аннотация. Настоящее исследование посвящено согласованному определению наборов исходных данных и критериев для создания оптимальной модели обработки контейнеров на терминале типа «сухой порт», обслуживаемом железнодорожным и автомобильным транспортом. Процесс создания модели должен учитывать приоритет в управлении работой железнодорожного и автомобильного транспорта, соблюдение баланса их интересов и соотношение между затратами на работу транспортно-перегрузочных механизмов и издержками, связанными с простоем транспортных средств или контейнеров.

В статье отмечено, что в части постановки задачи у многих авторов прослеживается ограниченность в подходах к понятию «оптимальная модель работы терминала» и применяемых критериях оптимальности. В исследовании предложен набор исходных данных, предназначенный для создания модели оптимальной работы, который включает в себя данные о характеристиках контейнеропотока, терминала, транспортно-перегрузочных механизмов и технологическом процессе обработки.

При создании оптимальной модели работы терминала есть возможность оценивать эффективность работы изолированно или в комплексе сразу в нескольких аспектах в зависимости от цели моделирования. Оценка может быть выполнена с использованием стоимостного критерия (стоимость переработки TEU), критерия в натуральном выражении (максимально возможный реализуемый объем переработки, продолжительность переработки) или интегрального критерия (натурально-стоимостного).

В результате выполнения работы выявлено, что полнота наборов исходных данных и определение расчетных параметров в нескольких возможных единицах измерения позволяют сделать модель адаптивной для различных задач моделирования и применения различных критериев оптимальности. Для данных изначально динамического характера процедура их получения в автоматизированном режиме из существующих информационно-управляющих систем существенно ускоряет и упрощает расчет, позволяя использовать его результаты для целей оперативного планирования и управления.

Ключевые слова: модель, исходные данные, критерий, контейнеры, терминальная обработка.

Natalia A. Kekish, Vladislav G. Pishchic

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

HARMONIZATION OF CRITERIA AND INPUT DATA SETS WHEN CREATING A MODEL OF OPTIMAL CONTAINER HANDLING AT THE TERMINAL

Abstract. *This study focuses on the harmonized definition of sets of source data and criteria for creating an optimal container handling model at a terminal of type «dry port» served by rail and road transport. The model development process should consider priority in managing rail and road transport, balancing their interests and the cost-benefit relationship between cargo equipment and inactivity of vehicles and/or containers, depending on the technology and speed of cargo handling.*

The article noted that in the part of setting the task, many authors have limited approaches to the concept of «optimal terminal operating model» and the applied criteria of optimality. The study proposes a set of initial data intended to create an optimal work model, which includes data on the characteristics of the container flow, terminal, transport and handling mechanisms and processing.

When creating the optimal terminal operation model, it is possible to evaluate the efficiency of the process in isolation or in a complex at once in several aspects depending on the purpose of the simulation. The valuation can be performed using a value criterion (cost of processing TEU), a criterion in terms of the natural value (maximum amount of processing to be realized, duration of processing) or an integral criterion (natural-cost value).

The work has shown that the completeness of the sets of source data and the determination of calculation parameters in several possible units of measurement make the model adaptive for various modeling tasks and application of different criteria of optimality. For data that is dynamic by nature, the procedure for automated retrieval from existing information management systems significantly accelerates and simplifies calculation, allowing its use for operational planning and management purposes.

Keywords: *model, source data, criteria, containers, terminal processing.*

Технология обработки контейнеров на терминале играет ключевую роль в обеспечении эффективного функционирования логистической цепочки. Оптимизация процессов обработки является ключевой задачей на контейнерном терминале, позволяет сократить время простоя, улучшить планирование контейнероперевозок, минимизировать издержки на хранение и транспортировку грузов, а также повысить общую производительность логистических операций. Создание модели оптимальной обработки контейнеров может значительно улучшить эффективность работы терминала. Под оптимальностью работы контейнерного терминала в общем понимании подразумевается эффективное и бесперебойное функционирование всех бизнес-процессов обработки контейнеропотока: прием, выполнение грузовых операций, хранение и отправка, информационное сопровождение.

В настоящее время наиболее распространенной трактовкой определения понятия «оптимальность» в отношении процесса терминальной обработки является минимизация продолжительности обработки и устранение задержек в обслуживании, а наиболее распространенным методом исследования в области оптимизации процессов терминальной обработки является моделирование. Авторами работы [1] справедливо указывается, что основным преимуществом моделирования, в том числе имитационного, является возможность анализа различных вариантов и что проведение подобных экспериментов невозможно на действующем терминале, поскольку это потребует высоких затрат, связанных с реорганизацией работ и возможным образованием очередей. Результатами моделирования являются вероятностные распределения потребности в транспортно-перегрузочном оборудовании при различных схемах организации работ, на основании которых может быть выбрана оптимальная схема обработки поезда. Под оптимальностью в данном случае понимается прежде всего максимальная скорость обработки.

В статье Журбы М. В. [2] под оптимальностью понимается решение задачи минимизации среднего времени грузовых работ на выбранном фронте. Задача распределения ресурсов по грузовым фронтам контейнерного терминала решается с помощью оптимизационных экспериментов. Они проводились на имитационной модели морского контейнерного терминала, разработанной в среде Anylogic. По итогу эксперимента был определен набор

ресурсов – погрузочной техники и человеческих ресурсов, при котором грузовые работы имеют минимальную среднюю длительность, а фронт обладает максимальной среднесуточной пропускной способностью.

В работе Хасанова Д. С. [3] для достижения оптимальной работы контейнерного терминала предлагается использовать моделирование его работы на основе использования технологии больших данных и мониторинга в реальном времени. С этой целью разработана система поддержки принятия решений (СППР) на контейнерном терминале с участием морского транспорта на основе цифровых двойников и технологий больших данных, демонстрирующая возможности мониторинга в реальном времени и интегрированной поддержки принятия решений. СППР обеспечивает оптимальные операционные планы и эталон для раннего предупреждения о задержке судна с помощью различных симуляторов распределения ресурсов на уровне планирования. Кроме того, эта система позволяет принимать оперативные решения в режиме реального времени благодаря мониторингу и анализу эффективности. Таким образом, основной акцент в работе сделан на предотвращение возникновения задержек в обработке и простоев, т. е. оптимальность трактуется прежде всего как реализация потребной перерабатывающей способности через минимально возможное время обработки.

В исследовании авторов работы [4] с помощью моделирования выполняется оценка влияния дефицита транспортно-перегрузочного оборудования при работе с морским транспортом. Подчеркивается, что одной из ключевых задач технологического проектирования и управления работой морского контейнерного терминала является минимизация времени обработки судна у причала. В указанной работе описаны алгоритмические средства, позволяющие оптимизировать время погрузочно-разгрузочных работ в случае неограниченного количества технологического оборудования. С помощью предложенной модели можно выявить задержки, вызванные невозможностью передать контейнер следующей машине в звене, предсказать их появление и оценить влияние на общую работу по разгрузке судна. Детальное компьютерное моделирование процессов позволяет выявить избыточное использование ресурсов терминала, а при их дефиците провести рациональное их распределение.

В диссертационном исследовании Васильева Д. В. [5] повышение эффективности терминальной обработки и организации контейнерных поездов рассматривается через оптимизацию работы транспортно-перегрузочных механизмов, понимаемую как определение порядка выполнения набора погрузочно-разгрузочных операций при терминальной обработке контейнеров, обеспечивающего минимальную длительность работы погрузочно-разгрузочных механизмов, сокращение избыточных перестановок контейнеров и холостого хода, снижение эксплуатационных затрат.

В статье [6] рассмотрена оптимизация взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта на контейнерном терминале. Устанавливается необходимость пересмотра критериев оптимизации расчета оптимального количества погрузочно-разгрузочных механизмов с учетом затрат на сверхнормативный простой автомобильных транспортных средств под грузовыми операциями свыше планового времени выполнения работ и затрат в связи с простоем железнодорожного подвижного состава на путях общего пользования в ожидании выполнения грузовых операций. Рассматриваемая методика предполагает, что прибытие контейнеров представляет собой случайный поток событий, а весь комплекс технических средств терминала является каналом обслуживания. Данное исследование отличается введением стоимостного критерия в понятие оптимального процесса терминальной обработки, однако полностью не уходит от первичности показателей простоя в сравнении различных вариантов организации работы на терминале и определения необходимого количества технических средств для терминальной обработки.

Таким образом, в работах [5] и [6] прослеживается единство подхода к стоимости контейнерооперации при выполнении погрузочно-разгрузочных работ как к одному из

основных показателей при выборе механизма. Очевидно, что стоимость погрузочно-разгрузочных работ будет значительно отличаться при выборе разных механизмов, так как каждый механизм имеет разные затраты на топливо, заработную плату работников, стоимость обслуживания и ремонта. Эта идея поддерживается в источнике [7], где предложен вариант расчета стоимости контейнероопераций и КРІ (ключевых показателей эффективности) для разных вариантов механизации. Программа расчета предназначена для определения стоимости контейнерооперации при выполнении погрузочно-разгрузочных работ автопогрузчиком, стреловым или козловым краном, ричстакером. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет параметров и выбор оптимального средства механизации грузовых работ с контейнерами; расчет КРІ контейнерного терминала двумя способами – по количеству переработанных (погруженных и выгруженных) контейнеров и по количеству номенклатурных единиц продукции, перевозимых в контейнерах. В данном исследовании, в отличие от предыдущих, имеется явный приоритет стоимостного критерия в определении показателей эффективности работы терминала, а также имеются некоторые обобщения в модели, которые сужают область ее применения. Например, авторы не учитывают различия в заработной плате водителя погрузчика и крановщика, а также адаптивности применения механизмов к разным типам и размерам контейнеров.

В целом можно констатировать обоснованность применения большинством авторов метода моделирования для определения оптимальных режимов работы терминала и набора требуемых технических средств, однако в части самой постановки задачи имеет место некоторая ограниченность в подходах к самому понятию «оптимальная модель работы терминала» и в оценке применяемых критериев оптимальности.

В рамках данного исследования предлагается рассмотреть создание оптимальной модели обработки контейнеров на терминале типа «сухой порт» при участии железнодорожного и автомобильного транспорта с учетом актуальности и приоритетности решения задач управления работой для железнодорожного и автомобильного транспорта, баланса их интересов и соотношения между стоимостью работы транспортно-перегрузочных механизмов и стоимостью простоя транспортных средств или контейнеров, определяемых скоростью переработки.

Эффективность работы терминала для создания оптимальной модели может быть оценена изолированно или в комплексе сразу в нескольких аспектах:

- повышение производительности путем сокращения времени простоев, оптимизации порядка и содержания операционных процессов, рационального использования транспортно-перегрузочных механизмов;

- обеспечение безопасности, включая предотвращение аварий и нарушение технологии работы, кибербезопасность, экономическую устойчивость для обеспечения конкурентоспособности;

- бесперебойность работы терминала с обеспечением потребной перерабатывающей способности, планового обслуживания и обновления материальной базы, программного обеспечения терминала;

- снижение трудоемкости обработки контейнеропотока за счет повышения уровня автоматизации процессов с использованием интеллектуальных и информационных систем управления;

- рациональное использование площади терминала путем оптимизации пространственного размещения контейнеров;

- адаптивность терминала к изменению эксплуатационной нагрузки.

Комплексный учет указанных аспектов возможен в виде стоимостного критерия (стоимость переработки TEU), критерия в натуральном выражении (максимально возможный реализуемый объем переработки, продолжительность переработки) или интегрального критерия (натурально-стоимостного). Очевидно, что натуральный и стоимостный критерии взаимозависимы, поэтому комплексный (интегральный) критерий будет наиболее показатель-

ным для оценки и сравнения различных вариантов. Выбор типа критерия или их приоритета (веса в случае интегрального показателя) зависит от цели моделирования.

Определение критерия стоимости переработки представляет собой многоаспектную задачу, поскольку он может быть выражен относительно различных единиц измерения, таких как вес одной тонны груза с учетом различных видов грузов, количество контейнеров, количество двадцатифутовых эквивалентов и др. Кроме того, расчет стоимости переработки может включать в себя как прямые издержки (затраты на обработку), так и косвенные расходы (убытки из-за простоев или сбоев в процессе обработки). При анализе стоимости обработки на контейнерном терминале важно учитывать все названные аспекты.

Критерий продолжительности обработки контейнера может быть выражен двумя способами: через полное время пребывания контейнера на терминале или в процентном отношении к общему времени его нахождения в логистической цепи (от отправителя до получателя). Показатель времени пребывания контейнера на терминале отражает эффективность технологии работы и уровень технического обеспечения. Критерий продолжительности обработки требует подробного анализа всех операций терминальной обработки, включая операции, зависящие от технологии и оборудования, операции, связанные с оформлением документации и другими процедурами, операции, которые не зависят напрямую от технологии (таможенные процедуры, ожидание выдачи контейнера клиенту), а также операции по очистке и ремонту контейнеров.

Критерий максимально достижимого объема переработки отражает гибкость в отношении различных нагрузок и возможность достижения требуемого результата путем изменения технологических режимов работы. Максимально достижимый объем переработки контейнеров определяет способность терминала оперативно реагировать на изменения в объемах и структуре грузовых потоков, что способствует эффективному использованию ресурсов и сокращению времени простоя оборудования.

Для создания модели оптимальной обработки контейнеров на терминале, которая будет являться адаптированной для применения различных критериев, необходимо иметь несколько наборов исходных данных. Эти наборы данных могут быть сгруппированы по признаку объекта, к которому они относятся: контейнеропоток, терминал, техническое оснащение, технология работы.

1. Данные о характеристиках контейнеропотока включают в себя следующее:

данные об объеме контейнеропотока в физических контейнерах за выбранный период. Конкретный тип контейнеропотока устанавливается в зависимости от цели моделирования (прибытие, отправление, сортировка, суммарный объем и т. д.). Далее при описании исходных данных под общим объемом контейнеропотока понимается общий объем контейнеропотока, участвующий в моделировании, измеренный в зависимости от цели моделирования в физических контейнерах (возможно, с дифференциацией по определенным типоразмерам) или в TEU;

данные о структуре контейнеропотока по типоразмерам (соотношение между 20-футовыми контейнерами и контейнерами других типоразмеров в общем объеме контейнеропотока), что дает возможность произвести при необходимости перерасчет показателей в TEU;

данные о структуре контейнеропотока по состоянию (соотношение между количеством порожних и груженых контейнеров в общем объеме контейнеропотока) для правильного подбора комбинации используемых транспортно-перегрузочных механизмов;

количество контейнероопераций (общее за выбранный период, в расчете на выбранный измеритель – физический контейнер определенного типоразмера или TEU, вагон);

интервалы поступления и отправления контейнеров с терминала или отдельных зон терминала.

В исследовании рассматривается переработка контейнеров, соответствующих стандарту ISO, с которыми можно производить штабелирование и захват хотя бы одним из вариантов

(снизу с торцевой или боковой стороны, сверху): универсальные, специализированные закрытого типа, совпадающих по параметрам с универсальными; открытого типа, с грузом не выходящим за очертание универсального контейнера аналогичного типа и размера.

В исходной модели задаются остаток контейнеров с дифференциацией по структуре контейнеропотока и состоянию на начало требуемого временного периода (час, смена, сутки и др.) в целом по терминалу или отдельно по зонам, интервалы поступления извне, интервалы отправления по каждому каналу поступления/отправления, количество контейнеров в каждой партии прибытия и отправления по каждому интервалу поступления.

Значение интервалов поступления контейнеров на терминал за любой требуемый период можно получить из автоматизированных информационно-управляющих систем (на Белорусской железной дороге данная информация содержится в соответствующих модулях системы ИАС ПУР ГП или системы сменно-суточного планирования). В эти системы постоянно поступает актуальная информация о подходе составов и о количестве и параметрах контейнеров в каждом составе. Для запуска процесса моделирования с использованием данных в реальном режиме времени необходимо выполнить интеграцию с информационно-управляющими системами железнодорожного транспорта. Заданный объем данных должен передаваться в буферный модуль для предварительной обработки и приведения к виду, необходимому для моделирования (преобразования данных о подходе и отправлении в данные о соответствующих интервалах, преобразования данных о номерах контейнеров в данные о типоразмерах).

2. Данные о характеристиках терминала:

количество и условное обозначение (маркировка) зон терминала. Зонирование терминала может быть выполнено в зависимости от степени прогнозирования технологической цепочки обработки [8]. Каждая зона имеет уникальный идентификатор из двух позиций, в котором первая позиция – буквенная (тип зоны по признаку зонирования, например, А/В/С), вторая позиция – цифровая (порядковый номер зоны определенного типа);

высота штабелирования в каждой зоне (максимальное количество ярусов);

обозначение системы складирования контейнеров (штабельная или стеллажная) [8] в каждой зоне;

усредненное расстояние между зонами, которое можно представить в виде шахматки расстояний (таблица 1).

Таблица 1 – Шахматка усредненных расстояний между зонами

Зона	A1	A2	C1
A1	0	$l(A1;A2)$		$l(A1;C1)$
A2	$l(A2;A1)$	0		$l(A2;C1)$
.....				
C1	$l(C1;A1)$	$l(C1;A2)$		0

В отличие от данных о контейнеропотоках, данные о характеристиках терминала не носят динамического характера и могут быть введены в процесс моделирования однократно.

3. Данные о характеристиках транспортно-перегрузочных механизмов:

– количество видов механизмов;

– признак привязки механизмов к зоне (вводится для каждого механизма);

– признак способа взаимодействия механизмов между собой при передаче контейнера (непосредственно или через промежуточную постановку контейнера на землю/в штабель);

– признак грузоподъемности (возможность механизма работать только с порожними или с гружеными и порожними контейнерами);

– характеристика скорости передвижения;

– средняя условная стоимость часа работы механизма;

– количество одновременно перемещаемых контейнеров;

– время работы механизма в течение суток;

– коэффициент надежности механизмов;

– признак выполняемых механизмом операций.

По признаку выполняемых операций все механизмы можно подразделить на транспортные, перегрузочные и транспортно-перегрузочные.

Транспортный механизм – механизм, предназначенный для перемещения контейнеров, не выполняющий функцию перегрузки на другое место хранения, с площадки или штабеля на транспортное средство напрямую, а также функцию забора из штабеля (кроме забора с первого яруса, если контейнеров в верхних ярусах нет). К транспортным механизмам можно отнести тележку AGV, контейнеровоз.

Перегрузочный механизм – механизм, который способен менять вертикальное и горизонтальное положения груза с ограниченной траекторией движения (например, кран-штабелер).

Транспортно-перегрузочный механизм – механизм, предназначенный для транспортировки и перегрузки контейнеров без ограниченной траектории перемещения (ричстакер, автокран, ротационный погрузчик).

Для программных расчетов оптимальной работы каждому механизму можно присвоить свой трехзначный код, описывающий его признаки (таблица 2).

В соответствии с данной кодировкой механизмы могут иметь следующие коды:

- ротационный погрузчик, ричстакер – 110;
- порталные краны – 111;
- тележка AGV, челночный контейнеровоз – 101;
- кран-штабелер – 011.

Таблица 2 – Кодировка механизмов

0** – механизм работает только с порожними контейнерами
1** – механизм работает с порожними и гружеными контейнерами
0 – механизм не имеет возможности подъема груза (транспортный)
1 – механизм имеет возможность подъема груза (транспортно-перегрузочный)
**1 – механизм привязан к конкретной зоне (зонам)
**0 – механизм не привязан к конкретной зоне

Данная кодировка позволяет учесть характеристики и конкретные условия работы каждого вида механизмов. Например, мобильные краны Liebherr могут рассматриваться и как привязанные к конкретной зоне, и как не привязанные к зоне – в зависимости от периода моделирования работы. Кодировка дает возможность изменить соответствующую характеристику для разных условий моделирования. Код признака привязки к зоне может быть дополнен полем, в котором будут указаны обозначения зон привязки.

В зависимости от способа взаимодействия при передаче контейнеров каждой паре механизмов можно присвоить код:

- 00 – не могут взаимодействовать без участия других механизмов;
- 01 – взаимодействуют косвенно (после постановки на землю);
- 11 – взаимодействуют напрямую.

Пример кодировки пар механизмов в модели по признаку способа взаимодействия представлен в таблице 3.

Характеристики механизмов и принципиальных способов их взаимодействия являются статичными. Варианты моделирования могут предусматривать различные комбинации одних и тех же механизмов либо изменение количества и видов механизмов для оценки целесообразности изменения технического оснащения с точки зрения минимизации (максимизации) заданных критериев.

Таблица 3 – Кодировка механизмов по способу взаимодействия

Наименование механизма	Погрузчик с ротатором	Портальные краны	Рич-стакер	Тележка AGV	Челночный контейнеровоз	Кран-штабелер	Автопогрузчик	Рельсовые тележки
Ротационный погрузчик	01	01	01	11	01	01	01	11
Портальные краны	01	01	01	11	01	01	01	11
Ричстакер	01	01	01	11	01	01	01	11
Тележка AGV	11	11	11	00	11	11	11	00
Челночный контейнеровоз	01	01	01	11	01	01	01	11
Кран-штабелер	01	01	01	11	01	01	01	11
Автопогрузчик	01	01	01	11	01	01	01	11
Рельсовые тележки	11	11	11	00	11	11	11	00

4. Данные о технологическом процессе обработки представлены количеством и характеристикой технологических линий обработки с указанием возможных наборов механизмов для каждой технологической линии и порядка их взаимодействия в соответствии с характеристикой механизмов и привязкой их к определенным зонам. Технологический процесс в модели может быть представлен как жестко заданный набор операций и используемых для их выполнения технических средств по каждому каналу обработки, так и как вариативный набор операций и технических средств, формируемый моделью по определенным алгоритмам в зависимости от эксплуатационной нагрузки и других факторов.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Для определения оптимальных режимов работы контейнерного терминала с учетом наличия различных вариантов технологии и технического оснащения, а также для определения уровня его адаптивности к изменениям эксплуатационной нагрузки необходимо проводить моделирование его работы. Качественное моделирование требует четкого определения критериев оценки вариантов с учетом их взаимовлияния, а также детального определения исходных данных для моделирования, соответствующих его цели. Полнота наборов исходных данных и определение расчетных параметров в нескольких возможных единицах измерения позволяют сделать модель адаптивной для различных задач моделирования и применения различных критериев оптимальности. Для данных изначально динамического характера (например, характеристики контейнеропотоков) должна быть предусмотрена процедура их получения в автоматизированном режиме из существующих информационно-управляющих систем. Только такая интеграция обеспечит необходимый уровень актуальности и достоверности данных для корректной работы модели, особенно в случае ее использования для целей оперативного планирования. Моделирование на основе искусственной вариативности данных изначально не динамического характера (характеристики механизмов и технологического процесса) ориентировано на поиск оптимального по заданным критериям режима работы терминала за счет изменения последовательности, содержания и технического обеспечения выполняемых операций.

Список литературы

1. Кузнецов, А. Л. Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов. – Текст : непосредственный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 2. – С. 243–253. – DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253. – EDN TAUEUL.
2. Журба, М. В. Построение оптимизационного эксперимента для решения задачи

оптимального распределения ресурсов по грузовым фронтам на контейнерном терминале / М. В. Журба. – Текст : непосредственный // Человек. Социум. Общество. – 2023. – № 11. – С. 194–204. – EDN PPDBXK.

3. Хасанов, Д. С. Распределение ресурсов для контейнерных терминалов в реальном времени / Д. С. Хасанов. – Текст : непосредственный // Информатизация и связь. – 2024. – № 4. – С. 70–77. – DOI 10.34219/2078-8320-2024-15-70-77. – EDN ERIGZN.

4. Кузнецов, А. Л. Оценка влияния дефицита оборудования на время разгрузки судна-контейнеровоза специальной постройки / А. Л. Кузнецов, Е. А. Давыденко, А. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Транспортное дело России. – 2024. – № 2. – С. 149–153. – EDN DBEQOL.

5. Васильев, Д. В. Повышение эффективности терминальной обработки и организации контейнерных поездов : специальность 2.9.4 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильев Дмитрий Владиславович; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара, 2023. – 143 с. – Текст : непосредственный.

6. Оптимизация взаимодействия автомобильного и железнодорожного транспорта в контейнерных терминалах / В. Д. Шепелев, Л. А. Зверев, З. В. Альметова, О. В. Гераскина. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 185–192. – DOI 10.14529/em180222. – EDN XRSXQD.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет стоимости контейнеро-операции и КРІ для разных вариантов механизации : № 2017610997 : заявлено 23.11.2016 : опубликовано 19.01.2017 / О. Д. Покровская, А. А. Смирнов. – Текст : непосредственный.

8. 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. – EDN HIWMZX.

References

1. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Semenov A.D. Application the simulation modeling methods for planning a container terminal internal operations. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova – Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 243-253. DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253. EDN TAUEUL. (In Russian).

2. Zhurba M.V. Optimization experiment for solving the problem of optimal resource distribution on the cargo fronts of a container terminal. *Chelovek. Sotsium. Obshchestvo. – Person. Community. Society*, 2023, no. 11, pp. 194-204. EDN PPDBXK. (In Russian).

3. Khasanov D.S. Real-time resource allocation for container terminals. *Informatizatsiia i sviaz' – Informatization and communication*, 2024, no. 4, pp. 70-77. DOI 10.34219/2078-8320-2024-15-70-77. EDN ERIGZN. (In Russian).

4. Kuznetsov A., Davydenko E., Nikitin A. Assessing the impact of equipment shortages at the time of unloading a special constructed container ship. *Transportnoe delo Rossii – Transport business in Russia*, 2024, no. 2, pp. 149-153. EDN DBEQOL. (In Russian).

5. Vasiliev D.V. *Povyshenie effektivnosti terminal'noj obrabotki i organizacii kontejnernih poezdov* (Improving the efficiency of terminal processing and organization of container trains). Doctor's thesis, Samara, 2023, 143 p. (In Russian).

6. Shepelev V.D., Zverev L.A., Almetova Z.V., Geraskina O.V. Optimization of interaction of automobile and railway transport in container terminals. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i menedzhment – Bulletin of the South Ural state university. Series: Economics and management*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 185-192. DOI 10.14529/em180222. EDN XRSXQD. (In Russian).

7. Pokrovskaja O.D., Smirnov A.A. *Certificate of state registration of the computer program № 2017610997*, 19.01.2017. (In Russian).

8. 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 prospective development of railway stations and junctions*, 2023, no. 1 (5), pp. 157-165. EDN HIWMZX. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кекиш Наталия Анатольевна

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление грузовой и коммерческой работой», БелГУТ.

Тел.: +375 (29) 682-66-93.

E-mail: natalia.kekish@gmail.com

Пищик Владислав Геннадьевич

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ).

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

Аспирант, ассистент кафедры «Управление грузовой и коммерческой работой», БелГУТ.

Тел.: +375 (29) 905-96-07.

E-mail: uladzislau.pishchic@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кекиш, Н. А. Согласование критериев и наборов исходных данных при создании модели оптимальной обработки контейнеров на терминале / Н. А. Кекиш, В. Г. Пищик. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 68 – 77.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kekish Nataliya Anatolyevna

Belarusian State University of Transport (BSUT).

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

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of Cargo and Commercial Work Management, BSUT.

Phone: +375 (29) 682-66-93.

E-mail: natalia.kekish@gmail.com

Pishchic Vladislav Gennadievich

Belarusian State University of Transport (BSUT).

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

Postgraduate student, assistant of the department of Cargo and Commercial Work Management, BSUT.

Phone: +375 (29) 905-96-07.

E-mail: uladzislau.pishchic@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kekish N.A., Pishchic V.G. Harmonization of criteria and input data sets when creating a model of optimal container handling at the terminal. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 68-77. (In Russian).

УДК 656.223.2

С. Б. Сатторов, А. Ш. Бозоров, Р. Ш. Бозоров

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

К ВОПРОСУ НОРМИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ ВАГОНОВ НА ПОДЪЕЗДНОМ ПУТИ

Аннотация. Эффективное использование железнодорожного подвижного состава является важным аспектом работы транспортной отрасли. Нахождение вагонов на подъездных путях играет значительную роль в общей производительности логистических цепочек. В статье рассматриваются основные подходы к нормированию времени нахождения вагонов, анализируются существующие проблемы и предлагаются методики оптимизации с учетом современных технологических решений. Целью данной работы является разработка методики нормирования времени нахождения вагонов на подъездных путях, направленной на сокращение простоев и повышение скорости грузооборота без ущерба для качества обработки грузов. Метод исследования включает в себя анализ текущего состояния эксплуатации подъездных путей, выявление основных проблем и ограничений, а также применение принципов теории массового обслуживания. Рассматриваются технологические и межоперационные составляющие времени нахождения вагонов на подъездных путях, включая непроизводительные простои. Особое внимание уделено сложности применения аналитического

метода из-за трудностей классификации подъездных путей, необходимости точного сбора данных и приближенности используемых формул. **Область применения результатов** включает в себя планирование и оптимизацию работы подъездных путей промышленных предприятий, терминалов и складских комплексов, интегрированных в мультимодальные цепочки поставок. Предложенная методика позволяет учитывать специфику технологических операций, технические характеристики подвижного состава и инфраструктурные ограничения. **Практическая значимость** работы заключается в возможности сокращения времени простоя вагонов, улучшения использования подвижного состава и повышения общей эффективности транспортной системы. **Внедрение** предложенных подходов способствует адаптации подъездных путей к изменениям внешних и внутренних условий, а также интеграции передовых технологий в управление логистическими процессами.

Ключевые слова: подъездные пути, грузооборот, оборот вагона, время, пропускная способность, простой, оптимизация.

Samandar B. Sattorov, Alisher Sh. Bozorov, Ramazon Sh. Bozorov

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

ON THE ISSUE OF RATIONING THE TIME SPENT BY WAGONS ON THE ACCESS ROAD

Abstract. Efficient use of railway rolling stock is an important aspect of the transportation industry. The presence of wagons on access roads plays a significant role in the overall performance of logistics chains. The article discusses the main approaches to rationing the time spent by wagons, analyzes existing problems and suggests optimization techniques based on modern technological solutions. **The purpose** of this work is to develop a methodology for rationing the time spent by wagons on access roads, aimed at reducing downtime and increasing the speed of cargo turnover without compromising the quality of cargo handling. **The research method** includes an analysis of the current state of operation of access roads, identification of the main problems and limitations, as well as the application of the principles of queuing theory. The technological and interoperable components of the time spent by wagons on access roads, including unproductive downtime, are considered. **Special attention** is paid to the complexity of applying the analytical method due to the difficulties of classifying access roads, the need for accurate data collection and the approximation of the formulas used. **The scope** of the results includes planning and optimizing the operation of access roads of industrial enterprises, terminals and warehouse complexes integrated into multimodal supply chains. The proposed methodology makes it possible to take into account the specifics of technological operations, the technical characteristics of rolling stock and infrastructural constraints. The practical significance of the work lies in the possibility of reducing the downtime of wagons, improving the use of rolling stock and increasing the overall efficiency of the transport system. **The implementation** of the proposed approaches contributes to the adaptation of access roads to changes in external and internal conditions, as well as the integration of advanced technologies into logistics process management.

Keywords: access roads, cargo turnover, wagon turnover, time, throughput, downtime, optimization.

Эффективное использование железнодорожных подъездных путей является важным элементом оптимизации логистических процессов. Железнодорожные подъездные пути – железнодорожные пути, предназначенные для транспортного обслуживания одного или нескольких предприятий, они обеспечивают связь между магистральными железнодорожными линиями и предприятиями, складскими комплексами или другими объектами, где осуществляется обработка грузов. Подъездные пути могут различаться по праву пользования, функциональному назначению, техническим характеристикам, интенсивности использования и уровню технологической оснащенности. Время нахождения вагонов на подъездных путях напрямую влияет на оборот вагонов, стоимость перевозок и общую эффективность транспортной системы.

Нормирование времени нахождения вагонов на подъездных путях представляет собой один из ключевых инструментов управления, направленных на минимизацию простоев вагонов и повышение скорости грузооборота. Это особенно актуально в условиях растущего объема грузоперевозок и необходимости интеграции железнодорожного транспорта в мультимодальные цепочки поставок. Правильное нормирование позволяет учитывать специфику операций на подъездных путях, технические характеристики подвижного состава, а также параметры работы терминалов и грузополучателей.

В настоящем исследовании рассматриваются принципы нормирования времени нахождения вагонов, а также методы его оптимизации с учетом современных технологий управления, подъездной путь представляет собой железнодорожный участок, предназначенный для непосредственного обслуживания конкретных предприятий и организаций, что отличает его от путей общего пользования. Анализируется текущее состояние использования подъездных путей, выявляются основные проблемы, влияющие на их эксплуатацию, и разрабатываются предложения по совершенствованию нормативной базы. Целью работы является создание методики, обеспечивающей сокращение времени простоя вагонов на подъездных путях без ущерба для качества грузообработки.

Общая протяженность железных дорог в Республике Узбекистан составляет 6118,3 км, из них общая протяженность железных дорог общего пользования составляет 4732,8 км (доля железных дорог общего пользования составляет 77,4 % – рисунок 1). В разрезе территорий наибольшая доля железных дорог общего пользования приходится на Ташкентскую область (941,2 км, или 15,4 % железных дорог), Республику Каракалпакстан (925,2 км, или 15,2 %) и Навоийскую область (862,6 км, или 14,1 %) [1].

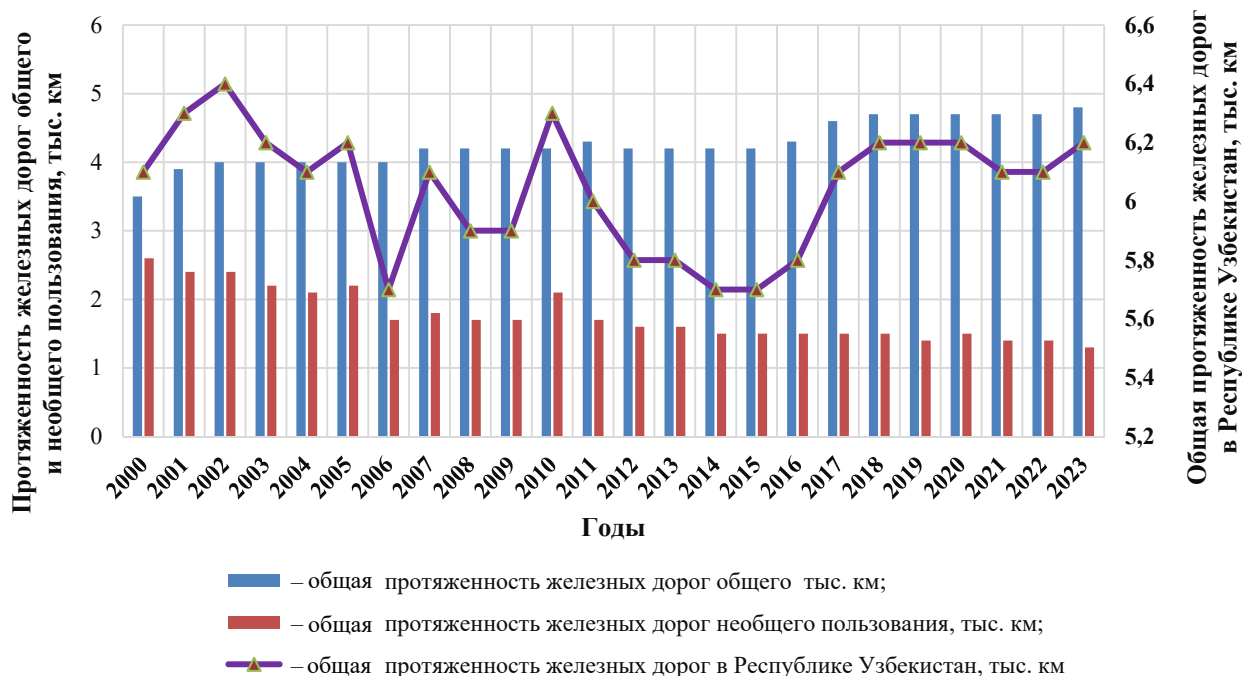


Рисунок 1 – Динамика изменения протяженности железных дорог

Эта инфраструктура охватывает основные промышленные и густонаселенные регионы страны, соединяя их с международными транспортными коридорами.

Для оптимизации грузоперевозок сеть железных дорог интегрируется с подъездными путями промышленных предприятий, что усиливает логистические возможности в республике. С точки зрения дальнейшего развития инфраструктуры значительное внимание уделяется электрификации путей, что увеличивает эффективность перевозок.

Анализ текущей ситуации в транспортной отрасли Узбекистана показывает значительное разнообразие в использовании транспортных средств и инфраструктуры для грузоперевозок. Железнодорожный транспорт остается основным видом перевозки грузов, особенно для тяжелых и объемных партий, занимая порядка 59 % от общего объема перевозок. Однако в последние годы увеличивается доля автомобильного транспорта, что связано с более высокой гибкостью и доступностью этого вида транспорта, особенно в удаленных и труднодоступных регионах [1 – 3].

Нехватка современных грузовых терминалов и логистических кластеров, особенно в регионах, примером могут служить Ферганская долина и Ташкентская область, с высокими

объемами производства и переработки сельскохозяйственной продукции, создают «узкие» места в логистике. Железнодорожные подъездные пути в некоторых регионах требуют модернизации для сокращения времени простоя вагонов. Кроме того, наблюдается износ подъездных путей к промышленным предприятиям, что замедляет скорость грузоперевозок и снижает их эффективность [1 – 3].

Наблюдается также увеличение нагрузки на дороги, что вызывает необходимость в их реконструкции и создании альтернативных маршрутов. Однако ресурсы на поддержание дорожной сети остаются ограниченными. Недостаточная взаимосвязанность железнодорожного и автомобильного транспорта приводит к увеличению времени доставки и издержек на перегрузку грузов. Выполнение оборота вагонов в АО «Узбекистон темир йуллари» (АО «УТЙ») по типам подвижного состава и по каждому региональному железнодорожному узлу показано на рисунках 2 и 3.

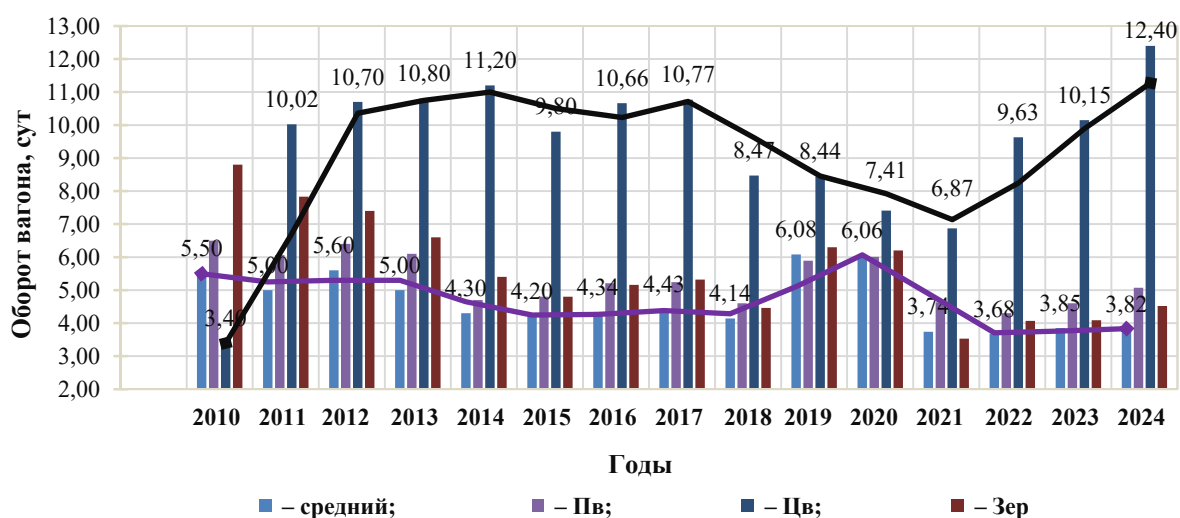


Рисунок 2 – Информация по выполнению оборота вагона в АО «УТЙ» с 2010 по 2024 г.

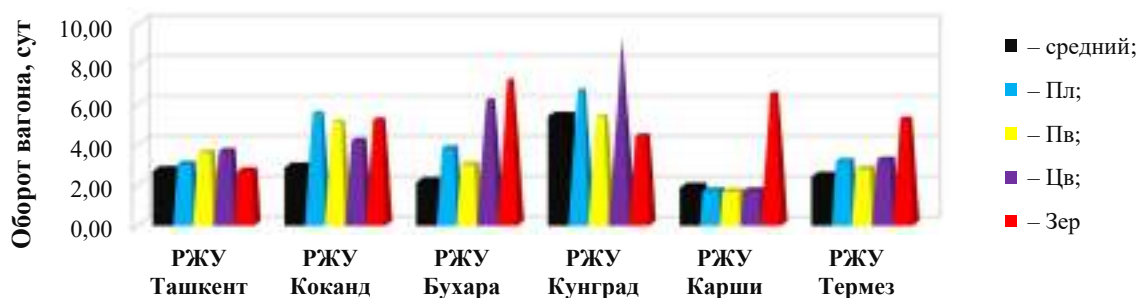


Рисунок 3 – Информация по выполнению оборота вагона по региональным железнодорожным узлам АО «УТЙ» за 2023 г.

Увеличение времени оборота цементовозов в 2024 г. в 3,6 раза по сравнению с 2010 г. свидетельствует о возможных проблемах в организации их погрузки, выгрузки и маршрутизации. Это может быть связано с нехваткой инфраструктуры, задержками на грузовых фронтах или увеличением объемов перевозок, которые не поддерживаются адекватными ресурсами. Время оборота универсальных крытых вагонов, платформ и зерновозов-хопперов выросло незначительно, что указывает на стабильную, но не оптимальную работу в соответствующих сегментах.

Анализ оборота вагонов по Бухарскому региональному узлу показывает, что доля цементовозов превышает средний вагонооборот на 111,02 %, что может говорить о значительных объемах цемента, обрабатываемого в регионе, или о сложностях с обеспечением своевременной обработки; доля зерновозов-хопперов на 146,1 % выше среднего оборота

вагона, что, вероятно, связано с сезонностью перевозок или высокими требованиями к перевозке зерна; доля универсальных платформ на 29,91 % выше среднего оборота вагона, что может быть обусловлено использованием платформ для разных видов грузов, включая нестандартные.

Исходя из проведенного анализа необходимо провести хронометраж операций погрузки и выгрузки, чтобы выявить «узкие» места. Требуется исследовать возможность увеличения мощности перегрузочных узлов или оптимизации маршрутов цементовозов, разработать рекомендации по сокращению простоев вагонов на грузовых фронтах [4, 5].

Важнейшим вопросом планирования эксплуатационной работы железнодорожного пути является нормирование времени нахождения вагонов на нем от приемки работниками подъездного пути до сдачи железной дороге. Это время складывается из многих элементов, которые можно объединить в две основные группы: затраты времени на технологические операции и межоперационные простои [6, 7, 13].

Общее время T нахождения вагонов на подъездном пути можно выразить как сумму:

$$T = \sum_{i=1}^n T_{\text{оп}}^{(i)} + \sum_{j=1}^m T_{\text{пр}}^{(j)}, \quad (1)$$

где $T_{\text{оп}}^{(i)}$ – время выполнения i -й технологической операции (погрузка, выгрузка, маневры, осмотр и т. д.); $T_{\text{пр}}^{(j)}$ – время j -го межоперационного простоя; n – число технологических операций; m – число межоперационных интервалов.

Целью исследования является минимизация общего времени нахождения вагонов:

$$T = \sum_{i=1}^n T_{\text{оп}}^{(i)} + \sum_{j=1}^m T_{\text{пр}}^{(j)} \rightarrow \min \quad (2)$$

при следующих ограничениях: $T_{\text{оп}}^{(i)} \geq T_{\text{мин}}^{(i)}$, $T_{\text{пр}}^{(j)} \geq 0$, $\forall i, j$.

Здесь $T_{\text{мин}}^{(i)}$ – минимально допустимое время выполнения операции.

Всем технологическим операциям может предшествовать период ожидания, который начинается с момента завершения предыдущей операции и заканчивается началом следующей. Эти периоды, включающие в себя, например, ожидание подачи вагона или его отправления, представляют собой непроизводительные простои вагонов на подъездном пути и вносят вклад в общее время их нахождения.

Межоперационные простои могут отсутствовать лишь при идеально отлаженной работе одноканальных систем. В отличие от этого подъездные пути промышленных предприятий представляют собой более сложные многофазные системы с нерегулярным входящим потоком вагонов и другими особенностями, которые неизбежно приводят к наличию межоперационных простоев. Анализ научно-исследовательской работы [6–9] показывает, что межоперационные простои могут занимать до половины общего времени пребывания вагонов на подъездных путях, что требует тщательной оптимизации для повышения эффективности работы.

Нормирование времени выполнения операций на подъездных путях представляет собой сложную задачу из-за большого количества факторов, влияющих на технологические процессы, и их изменчивости. Разные типы вагонов и операций, вариативность маршрутов, а также влияние межоперационных простоев требуют комплексного подхода с использованием статистического анализа и математического моделирования [10–12].

Основные факторы, определяющие продолжительность операций и простоев:

- тип операций (T_i): погрузка, выгрузка, расформирование, накопление и др.;
- тип груза (R): тарно-штучный, навалом, контейнерный, наливной и т. д.;
- тип подвижного состава (P): полувагоны, платформы, цистерны и др.;
- количество вагонов в группе (N_g): объем операции;
- взаимодействие с другими маршрутами (M): наличие «враждебных» маршрутов;
- инфраструктурные ограничения (L): число путей, фронтов погрузки и выгрузки;

- организационные особенности (O): уровень управления и регулирования;
- межоперационные простои (W): ожидания подачи, отправления, маневров и др.

Продолжительность технологической операции $T_{\text{тех}}$ для i -го типа вагонов на участке может быть представлена так:

$$T_{\text{тех}}^{(i)} = \sum_{j=1}^{n_i} T_j^{(i)} \cdot f(R, P, N_g, L, O), \quad (3)$$

где $T_j^{(i)}$ – базовое время выполнения j -й операции для i -го типа вагонов;

$f(R, P, N_g, L, O)$ – функция поправочных коэффициентов, зависящих от внешних и внутренних факторов.

Средневзвешенное время выполнения операций для группы вагонов k

$$T_{\text{ср}}^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} (T_{\text{тех}}^{(i)} \cdot N_i)}{\sum_{i=1}^{n_k} N_i}, \quad (4)$$

где N_i – количество вагонов, прошедших i -й тип операций.

Общая продолжительность межоперационных простоев W на участке зависит от продолжительности операций ($T_{\text{тех}}$), взаимодействия с другими маршрутами (M) и инфраструктурных ограничений (L).

Модель времени простоев:

$$W = g(T_{\text{тех}}, M, L, O), \quad (5)$$

где $g(T_{\text{тех}}, M, L, O)$ – функция, отражающая влияние факторов на простои.

Общее время нахождения вагона $T_{\text{общ}}$ на подъездном пути состоит из суммы времени выполнения операций и простоев:

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{тех}} + W. \quad (6)$$

С учетом факторов общая модель имеет вид:

$$T_{\text{общ}}^{(i)} = \sum_{j=1}^{n_i} T_j^{(i)} \cdot f(R, P, N_g, L, O) + g(T_{\text{тех}}, M, L, O). \quad (7)$$

Для нахождения оптимального решения функций f и g , описывающих технические, организационные и инфраструктурные ограничения, применяется метод линейного программирования.

Таким образом, полная задача оптимизации может быть записана в виде:

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{тех}} + W \rightarrow \min. \quad (8)$$

при следующих ограничениях:

1. Доступное количество путей и фронтов: $L_{\text{исп}} \leq L_{\text{доступ}}$, где $L_{\text{исп}}$ – количество путей и фронтов, фактически используемых для выполнения операций (включая погрузку, выгрузку, маневры); $L_{\text{доступ}}$ – количество доступных путей и фронтов для использования.

2. Ограничения на продолжительность технологических операций: $T_{\text{тех}} \leq T_{\text{тех max}}^{(i)}$, $i = \overline{1, n}$, где $T_{\text{тех}}^{(i)}$ – продолжительность технологической операции типа i ; $T_{\text{тех max}}^{(i)}$ – максимально допустимая продолжительность операции типа i , определенная в рамках технологических стандартов.

3. Ограничение на пропускную способность грузового пункта: $\sum_{i=1}^n Q_i \leq Q_{\text{max}}$, где Q_i – количество операций, выполняемых в рамках технологической операции типа i ; Q_{max} – максимально возможный пропускной объем для данного участка подъездного пути.

4. Ограничение на время межоперационного простоя: $W_{\text{min}} \leq W \leq W_{\text{max}}$, где W_{min} – минимальное время межоперационного простоя, которое можно обеспечить при

оптимальном управлении; W_{\max} – максимально допустимое время ожидания, которое не должно превышать определенные нормативы.

5. Ограничения на доступность ресурсов (оборудования, подвижного состава): $R_{\text{испр}} \leq R_{\text{доступ}}$, где $R_{\text{испр}}$ – количество ресурсов (например, маневровых локомотивов, работников, подвижного состава), фактически используемых для выполнения операций; $R_{\text{доступ}}$ – общее количество доступных ресурсов.

6. Ограничения на количество вагонов в операции: $N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max}$, где N_i – количество вагонов, обрабатываемых за одну операцию i ; N_{\min} и N_{\max} – минимальные и максимальные ограничения на количество вагонов, обрабатываемых в рамках каждой операции.

Решение этой задачи позволит эффективно управлять потоками вагонов на подъездных путях, сократить простои и оптимизировать использование доступных ресурсов.

Основные ограничения, с которыми сталкивается использование аналитического метода для оптимизации работы подъездных путей на промышленном транспорте, включают в себя следующие факторы.

1. Невозможность массовой классификации и типизации подъездных путей. Реальные подъездные пути представляют собой уникальные системы с различными характеристиками, которые сложно свести к стандартной модели или классификации.

2. Применимость теории массового обслуживания. Подъездные пути можно рассматривать как системы массового обслуживания, однако для таких сложных и динамичных систем не разработан полноценный математический аппарат, который мог бы учитывать все особенности таких систем.

3. Сложность и трудоемкость сбора числовых данных. Для корректных расчетов и оптимизации необходимо собирать точные и обширные данные о работе подъездных путей, что требует значительных затрат времени и ресурсов.

4. Использование хронометражных или статистических данных. Хронометражные и статистические данные могут дать информацию о текущем состоянии работы, однако они не позволяют точно оценить, работал ли подъездной путь в оптимальном режиме. Более того, при изменении внешних или внутренних условий такие данные требуют дополнительных исследований и обновлений.

5. Приближенность аналитических формул. Формулы, используемые для расчетов с применением аналитического метода, часто являются приближенными, что снижает точность расчетов и делает их менее применимыми в реальных условиях.

Таким образом, из-за сложности системы подъездных путей, неопределенности в данных и ограничений текущих математических моделей применение аналитического метода в его традиционном виде сталкивается с рядом проблем. Требуется разработка более гибких и точных методов, включая использование численных методов, симуляции и адаптивных моделей, которые могут более точно описать динамику работы подъездных путей в реальных условиях.

Оптимизация работы подъездных путей на промышленном транспорте представляет собой сложную задачу, требующую всестороннего подхода с учетом множества переменных факторов. Анализ существующих методов нормирования и оптимизации и применение теории массового обслуживания показали, что традиционные аналитические методы сталкиваются с рядом ограничений, включая трудности в классификации и типизации подъездных путей и сложности в сборе и обработке необходимых данных.

Одной из ключевых проблем является невозможность применения универсальных норм для всех технологических операций на подъездных путях, так как каждая операция может значительно варьироваться в зависимости от типа вагона, вида операции и внешних факторов, таких как наличие свободных путей и инфраструктурных ограничений. Эти обстоятельства делают использование хронометражных и статистических данных затруднительным, а применение аналитических формул – приближенным.

Математическая модель оптимизации управления технологическими процессами на подъездных путях железнодорожного транспорта, позволяющая минимизировать суммарное время простоя вагонов, делает возможным учитывать ключевые факторы: базовое время технологической операции, объем группы вагонов, влияние инфраструктурных ограничений, организационные особенности и межоперационные простои.

Таким образом, представленный подход позволяет не только теоретически обосновать оптимизацию логистических процессов, но и снизить время простоя вагонов, что ведет к повышению эффективности использования ресурсов и снижению эксплуатационных затрат на подъездных путях. Дальнейшее развитие математических моделей и внедрение автоматизированных информационных систем, основанных на предложенной методике, будут способствовать адаптивному управлению транспортными потоками и дальнейшей модернизации железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Холмаматов, Д. Х. Состояние и анализ развития инфраструктуры транспортных услуг в Узбекистане / Д. Х. Холмаматов. – Текст : непосредственный // Экономика и социум. – 2023. – № 12-2 (115). – С. 1034–1044. – EDN ZDWDRС.
2. Общая длина железных дорог // stat.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://stat.uz/ru/press-tsentr/novosti-goskomstata/24429-temir-yo-llarning-umumiy-uzunligi> (дата обращения: 10.03.2025).
3. Корнилов, С. Н. Анализ и систематизация факторов, влияющих на время оборота вагонов ОАО «РЖД» по подъездным путям промышленных предприятий / С. Н. Корнилов, А. Н. Антонов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов : сборник трудов международной конференции, Санкт-Петербург, 21–22 октября 2010 г. / под ред. Е. П. Дудкина, Е. С. Свинцова. – Санкт-Петербург : ОМ-Пресс, 2011. – С. 46–53. – EDN QBTIVT.
4. Кузнецов, В. Г. Методика расчета показателей простоя вагонов на железнодорожной станции на основе пономерного способа их учета / В. Г. Кузнецов, О. И. Бик-Мухаметова. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 54–60. – EDN YLQXRR.
5. Шеховцов, А. И. Алгоритм нахождения вагонов на путях необщего пользования как основа для повышения качества функционирования системы «железная дорога – клиенты» / А. И. Шеховцов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 119–128. – EDN QСMZRM.
6. Чеботарева, Е. А. К вопросу совершенствования эксплуатационной работы магистрального транспорта во взаимодействии с подъездными путями промышленных предприятий / Е. А. Чеботарева, И. А. Солоп, С. А. Солоп. – Текст : непосредственный // Научный взгляд в будущее. – 2019. – Т. 1. – № 15. – С. 59–73. – DOI 10.30888/2415-7538.2019-15-01-001. – EDN URCNXK.
7. Попов, А. Т. Совершенствование методики расчёта средневзвешенного оборота полувагонов металлургического предприятия / А. Т. Попов, А. С. Хмелев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 1 (86). – С. 184–195. – DOI 10.30932/1992-3252-2020-18-184-195. – EDN С1СВАА.
8. Дудкин, Е. П. Проблемы и перспективы развития промышленного железнодорожного транспорта / Е. П. Дудкин, В. М. Рыбачок, Е. С. Свинцов. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 7 (7). – С. 46–49. – EDN JXСMZN.
9. Пулатов, П. Н. Условия обеспечения погрузки, ускорения оборота вагона и стоимостной оценки вагоно-часа по родам подвижного состава / П. Н. Пулатов. – Текст : непосредственный // Тихомировские чтения: наука и современная практика технологии перевозочного процесса : материалы международной научно-практической конференции,

Гомель, 20–21 октября 2022 г. / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2023. – С. 268–278. – EDN SWMOSD.

10. Акулиничев, В. М. Организация перевозок на промышленном транспорте / В. М. Акулиничев. – Москва : Высшая школа, 1983. – 247 с. – Текст : непосредственный.

11. Смехов, А. А. Оптимизация процессов грузовой работы / А. А. Смехов. – Москва : Транспорт, 1973. – 263 с. – Текст : непосредственный.

12. Котенко, А. Г. Организация перевозок местных грузов на железных дорогах Республики Узбекистан в условиях увеличения транзитного грузопотока / А. Г. Котенко, С. Б. Сатторов. – Текст : непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы-2021 : материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 9 – 10 ноября 2021 г. / Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН. – Санкт-Петербург, 2021. – Том 1. – С. 127–132. – EDN ACGPHG.

13. Сатторов, С. Б. Критерии определения опорных станций для работы с поездами, перевозящими местные грузы на территории Республики Узбекистан / С. Б. Сатторов, А. Г. Котенко. – Текст : непосредственный // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. / Российский университет транспорта. – Москва, 2021. – С. 238–244. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.34. – EDN TASPLK.

References

1. Kholmamatov D.Kh. Status and analysis of development of transport services infrastructure in Uzbekistan. *Ekonomika i sotsium – Economy and society*, 2023, no. 12-2(115), pp. 1034-1044. EDN ZDWDRС. (In Russian).

2. *Obshchaia dlina zheleznykh dorog* [Total length of railways]. Available at: <https://stat.uz/ru/press-tsentr/novosti-goskomstata/24429-temir-yo-llarning-umumiy-uzunligi> (accessed 10.03.2025).

3. Kornilov S.N., Antonov A.N. [Analysis and systematization of factors affecting the turnover time of Russian Railways wagons along the access roads of industrial enterprises]. *Sovremennye problemy proektirovaniia, stroitel'stva i ekspluatatsii transportnykh ob'ektov, Sankt-Peterburg, 21–22 oktiabria 2010 goda* [Modern problems of design, construction and operation of transport facilities. St. Petersburg, October 21-22, 2010]. St. Petersburg, 2011, pp. 46-53. EDN QBTIVT. (In Russian).

4. Kuznetsov V.G., Bik-Mukhametova O.I. Method of calculation the downtime cargo rail vehicles on the basis of a number way of their account. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2016, no. 2 (33), pp. 54-60. EDN YLQXRR. (In Russian).

5. Shekhovtsov A.I. Algorithm of cars' presence on non-public tracks as a basis for improving the quality of operation of the "railway – clients" system. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2020, no. 3 (43), pp. 119-128. EDN QCMZRM. (In Russian).

6. Chebotareva E.A., Solop I.A., Solop S.A. To the question of improvement of operational work of main transport in interaction with access ways of industrial enterprises. *Nauchnyj vzglad v budusee – Scientific look into the Future*, 2019, vol. 1, no. 15, pp. 59-73. DOI 10.30888/2415-7538.2019-15-01-001. EDN URCNXK.

7. Popov A.T., Khmelev A.S. Improving the methodology for calculating the average turnover of gondola cars of an iron and steel plant. *Mir transporta – World Of Transport And Transportation*, 2020, vol. 18, no. 1(86), pp. 184-195. DOI 10.30932/1992-3252-2020-18-184-195. EDN CICBAA.

8. Dudkin E.P., Rybachok V.M., Svintsov E.S. Problems and prospects of industrial railway transport development. *Transport Rossiiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 7(7), pp. 46-49. EDN JXCMZN. (In Russian).

9. Pulatov P.N. [Conditions for ensuring loading, acceleration of wagon turnover and cost estimation of wagon-hour by type of rolling stock]. *Tikhomirovskie chteniia: nauka i sovremennaiia praktika tekhnologii perevozochного protsessa : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Gomel', 20–21 oktiabria 2022 g.* [Tikhomirov Readings: Science and modern practice of transportation process technology : proceedings of the International Scientific and practical conference, Gomel, October 20–21, 2022]. Gomel, 2023, pp. 268–278. EDN SWMOSD. (In Russian).
10. Akulinichev V.M. *Organizatsiia perevozok na promyshlennom transporte* [Organization of transportation in industrial transport]. Moscow, Higher School Publ., 1983, 247 p. (In Russian).
11. Smekhov A.A. *Optimizatsiia protsessov gruzovoi raboty* [Optimization of cargo work processes]. Moscow, Transport Publ., 1973, 263 p. (In Russian).
12. Kotenko A.G., Sattorov S.B. [Organization of local cargo transportation on the railways of the Republic of Uzbekistan in the conditions of increasing transit freight flow]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy-2021 : materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sankt-Peterburg, 09–10 noiabria 2021 goda* [Transport of Russia: Problems and prospects-2021 : proceedings of the International Scientific and practical conference, St. Petersburg, November 09–10, 2021]. St. Petersburg, 2021, vol. 1, pp. 127–132. EDN ACGPHG. (In Russian).
13. Sattorov S.B., Kotenko A. G. [Criteria for determining reference stations for working with trains carrying local goods on the territory of the Republic of Uzbekistan]. *Akademik Vladimir Nikolaevich Obraztsov – osnovopolozhnik transportnoi nauki : trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 125-letiiu universiteta, Moskva, 22 oktiabria 2021 goda* [Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov, the founder of transport science : Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the University, Moscow, October 22, 2021]. Moscow, 2021, pp. 238–244. DOI 10.47581/2022/ Obrazcov.34. EDN TASPLK. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сатторов Самандар Бахтиерович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, 100060, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

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

Тел.: +998 (77) 073-51-57.

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

Бозоров Алишер Шамилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, 100060, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Научный соискатель кафедры «Транспортно-грузовые системы», ТГТРУ.

Тел.: +998 (65) 524-68-18.

E-mail: bazarovalisher2402@gmail.com

Бозоров Рамазон Шамилович

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТРУ).

Темирйўлчилар ул., д. 1, 100060, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

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

Тел.: +998 (91) 251-33-77.

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sattorov Samandar Baxtiyorovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryulchilar st., 1, 100060, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

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

E-mail: satorovsamandar100@gmail.com

Bozorov Alisher Shamilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryulchilar st., 1, 100060, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Scientific candidate of the department «Transportation and cargo systems», TSTU.

Phone: +998 (65) 524-68-18.

E-mail: bazarovalisher2402@gmail.com

Bozorov Ramazon Shamilovich

Tashkent State Transport University (TSTU).

Temiryulchilar st., 1, 100060, Tashkent City, the Republic of Uzbekistan.

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department «Transport cargo system», TSTU.

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

E-mail: ramazon-bozorov@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сатторов, С. Б. К вопросу нормирования времени нахождения вагонов на подъездном пути / С. Б. Сатторов, А. Ш. Бозоров, Р. Ш. Бозоров. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 77 – 87.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sattorov S.B., Bozorov A.Sh., Bozorov R.Sh. On the issue of rationing the time spent by wagons on the access road. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 77-87. (In Russian).

УДК 656.1/.5

А. С. Аветисян

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНИТУ),
г. Иркутск, Российская Федерация

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОГО СЕРВИСА ДЛЯ НУЖД ГОРОДСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Аннотация. Для улучшения городской мобильности необходимо учитывать мнение пассажиров о качестве наземного общественного транспорта. Исследование предлагает сделать восприятие качества обслуживания основой разработки политики в области городского транспорта, подчеркивая, что подход, ориентированный на пользователя, критически важен для формирования устойчивых транспортных привычек. Активное привлечение и учет отзывов пассажиров позволяют городам повышать лояльность и привлекать новых пользователей. Исследование основывается на методологиях оценки показателей качества в транспортной экосистеме, особенно в мультимодальных перевозках, позволяя понять настроения различных сегментов пассажиров. Городской транспорт должен соответствовать ожиданиям горожан, что достигается посредством согласования амбиций городских властей, возможностей операторов и желаний общественности. Концепции, стимулирующие использование общественного транспорта, направлены на создание более устойчивых городских экосистем. Ключевым элементом является целостная система планирования. Она принимает во внимание различные аспекты качества: фактическое качество, предоставляемое операторами, целевое качество, определенное регуляторами, субъективное качество, основанное на опыте пассажиров, и желаемое качество, отражающее потребности пользователей. Исследование подчеркивает необходимость формализованных процессов оценки, признавая рациональность выбора пассажирами наиболее выгодного способа передвижения. Интеграция воспринимаемых показателей качества – ценный инструмент для информированного управления. Оценка и учет мнения пользователей о качестве – важный компонент прогрессивной политики в области городского транспорта, предоставляющий преимущества городским администрациям (для стратегического планирования) и транспортным компаниям (для оптимизации маршрутов и сервиса). Таким образом, создание комплексного механизма оценки качества, ориентированного на пользователя, является ключевым для повышения эффективности и удовлетворенности в городском транспорте.

Ключевые слова: городская мобильность, качество наземного транспорта, мнение пассажиров, политика городского транспорта.

Arthur S. Avetisyan

Irkutsk National Research Technical University (IRNTU), Irkutsk, the Russian Federation

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR ASSESSING THE QUALITY OF TRANSPORT SERVICES FOR THE NEEDS OF URBAN PLANNING

Abstract. Incorporating passenger perspectives on the quality of ground public transport is paramount for enhancing urban mobility. This study champions the idea of making service quality perception the linchpin of urban transport policy formulation, thereby underscoring a user-centric methodology for cultivating sustainable transportation habits. By integrating passenger feedback, cities can effectively bolster user loyalty and entice new riders to embrace public transport. The research based on the importance of evaluating quality indicators within multimodal systems, which is essential for deciphering the spectrum of passenger sentiments. For urban transport to truly cater to citizen expectations, it is imperative to harmonize city authority ambitions, operator capabilities, and public desires, thereby creating sustainable urban ecosystems. At the heart of this approach lies a holistic planning system that encompasses operator-provided quality, regulator-set target quality, perceived quality, and desired quality. The study places emphasis on formalized assessment processes, acknowledging that passengers make rational choices, gravitating towards the most

advantageous travel options. Integrating perceived quality indicators is invaluable for fostering informed management decision-making, which benefits both city administrations in strategic planning and transport companies in route and service optimization. Therefore, a comprehensive, user-centered quality assessment mechanism is pivotal for enhancing efficiency and satisfaction in urban transport, ultimately fostering a more sustainable and user-friendly urban environment.

Keywords: urban mobility, quality land transport, opinion passengers, urban transport policy.

Городской общественный транспорт является важнейшим компонентом городской жизни, на который значительно влияют внешние факторы, непосредственно формирующие спрос на пассажирские перевозки. Эффективная городская мобильность зависит от согласования целей транспортных агентств, оперативных возможностей поставщиков услуг и потребностей населения, что стимулирует отказ от использования частных транспортных средств. Концепция «Избегать – менять – улучшать» предлагает ценную стратегию для управления поведением населения и содействия внедрению общественного транспорта. Центральное место в этом занимает система транспортного планирования, которая целостно объединяет различные аспекты качества обслуживания [1, 2].

Учитывая, что выбор пассажиров определяется рациональными соображениями, важно использовать более формализованный подход к принятию решений. Устранение субъективности, присущей оценке качества обслуживания, остается ключевой задачей, требующей дальнейшего изучения и практической интеграции в управление городскими системами общественного транспорта для повышения их эффективности. В таблице представлена сравнительная таблица показателей качества транспортных услуг.

Таблица показателей качества транспортных услуг, используемых в России, ЕС, Китае и США

Параметр оценки качества	Инструмент оценки	ЕС	РФ	КНР	США
1	2	3	4	5	6
Степень доступности	Стабильность и регулярность обслуживания	+	+		+
	Режим работы	+	+		+
	Организация посадки и высадки пассажиров	+			+
	Охват маршрутной сети	+			+
	Ценовая доступность	+	+	+	+
	Удаленность конечных и начальных остановок			+	+
Информационная поддержка	Остановочные пункты	+	+		+
	Цифровые сервисы	+	+		
	Графики движения и схемы маршрутов	+		+	+
	Время ожидания и задержки в пути	+			+
	Уведомление об изменениях				+
Затраты времени	Непосредственно в транспорте	+		+	+
	На остановочном пункте и по дороге к нему	+		+	
	Во время пересадки	+	+	+	+
	Пунктуальность выполнения рейсов	+		+	
Комфорт использования	Сопоставление с альтернативными видами транспорта	+	+	+	+
	Внутреннее пространство транспортного средства	+	+	+	+
	Наполненность салона	+			+
	Внешний вид транспортного средства	+	+		
Обслуживание клиентов	Соответствие потребностям пассажиров	+	+		+
	Стандарты обслуживания	+			+
	Реакция персонала	+			+
	Реакция на отзывы				+

1	2	3	4	5	6
Степень безопасности	Повышение качества обслуживания на основе обратной связи	+		+	+
	Безопасность на остановке и при подходе к ней	+		+	
	Безопасность движения транспорта	+		+	+
	Безопасность пассажиров во время передвижения в салоне	+		+	
	Безопасность в салоне	+		+	+
Воздействие на окружающую среду	Экологичность услуги	+	+		
	Уменьшение загруженности дорог	+			
	Уменьшение выбросов загрязняющих веществ	+			

Использование данных, приведенных в таблице, позволяет стратегически адаптировать проверенные методы для создания улучшенных и более доступных вариантов транспорта, специально разработанных для решения уникальных задач данного региона.

Повышение качества общественного транспорта требует единого, комплексного подхода, ориентированного на качество обслуживания пассажиров и выходящего за рамки разрозненных нормативных показателей. Хотя такие системы, как EN 13816 EC (европейский стандарт, который устанавливает требования к качеству услуг общественного пассажирского транспорта), Социальный стандарт Министерства транспорта России, рекомендации по анализу автобусных перевозок в Китае и руководства по удовлетворенности пользователей в США, дают ценную информацию, они часто не могут быть объединены в единую систему, ориентированную на пользователя [3, 4].

Современные методики оценки качества, которые часто диктуются на региональном уровне, как правило, не учитывают весь маршрут пассажира, который часто включает в себя несколько видов транспорта и пересадок. Чтобы по-настоящему усовершенствовать общественный транспорт, необходим более широкий подход к разработке современных, точных критериев качества (рисунок 1), которые объективно отражают опыт интегрированных мультимодальных перевозок и действительно отвечают потребностям пользователей.



Рисунок 1 – Обеспечение качества транспортного сервиса

Удовлетворение разнообразных потребностей пользователей транспорта, обусловленных их социально-экономическим положением, имеет решающее значение для устойчивой городской мобильности. Восприятие качества обслуживания различными группами пользователей (например, работниками, студентами, пожилыми людьми) различается, что требует применения индивидуальных подходов. Чтобы понять и устранить эти различия, необходим анализ спроса, включающий в себя такие ключевые факторы, как качество обслуживания, цена, доступность и время [5].

Игнорирование потребностей пассажиров вредит общественному транспорту, потенциально вынуждая людей пересаживаться в частные автомобили, такси или пользоваться услугами каршеринга. Это приводит к увеличению пробок на дорогах и ухудшению качества воздуха. Таким образом, ориентированный на пользователя подход необходим для поддержания устойчивых транспортных привычек и бесперебойного функционирования системы.

Разработка комплексной системы для интеграции и мониторинга предполагаемых показателей качества включает в себя несколько задач:

- определение системы показателей качества: составьте приоритетный список показателей с целевыми значениями;

- разработка методологий оценки: используйте сочетание производственных показателей, опросов и таких методов, как «тайный покупатель»;

- сегментирование групп пользователей: классифицируйте пользователей по возрасту, социальному статусу, цели поездки и выбору вида транспорта;

- визуализация взаимосвязей показателей: отображение связей между метриками и их восприятием различными группами пользователей;

- разработка моделей оценки качества: используйте математические модели для оценки качества обслуживания для каждой группы пользователей.

По мере повышения уровня жизни растут и ожидания в отношении качества транспорта, что делает рынок чувствительным к социально-экономическим и отраслевым изменениям. Поскольку изменения в маршрутах и ценах, если они не реализованы должным образом, могут вызвать большой дискомфорт у пользователя, не рекомендуется изменять более 15 – 20 % существующих маршрутов. Городской пассажирский транспорт, как правило, является мономодальным, и необходимо учитывать мультимодальные маршруты. Поэтому при выборе маршрута важно учитывать такие факторы, как доступность, продолжительность поездки, комфорт, безопасность, экологичность, предпочтения пользователей и удобство трансферов.

Традиционные оценки транспортных услуг, часто основанные на опросах пользователей, подвержены субъективной предвзятости и двусмысленности в интерпретации вопросов. Для получения более надежной оценки важно отказаться от расплывчатой терминологии. Экспертные оценки, основанные на взвешенных критериях и лонгитюдных данных, предлагают более объективный подход. Полный набор показателей необходим для точной оценки удовлетворенности пользователей [6].

Учитывая многогранный характер транспортных проектов, применение поправочных коэффициентов улучшает расчет общего показателя качества. Такие методы, как метод Дельфи и парные сравнения, позволяют уточнить мнения экспертов, подчеркивая важность отбора репрезентативных респондентов. Хотя продолжительность поездки является важным показателем, восприятие времени, зависящее от таких факторов, как время ожидания и удобство пересадки, играет решающую роль в формировании впечатлений пассажиров. Нелинейная зависимость между фактическим и предполагаемым временем ожидания подчеркивает необходимость учета субъективных впечатлений в показателях, основанных на времени (рисунок 2).

Бесперебойная пересадка и минимизация общей продолжительности поездки имеют первостепенное значение для повышения комфорта и удовлетворенности пассажиров, поскольку сокращение времени в пути и ожидания позволяет им эффективнее использовать его для работы, отдыха или других целей.



Рисунок 2 – Пример использования метода Дельфи

Восприятие путешественниками времени, затрачиваемого на транспортировку, существенно различается в зависимости от этапа путешествия. Ожидание и пересадки воспринимаются более негативно, чем время, затрачиваемое на активное путешествие. Важно отметить, что доступность транспортных средств, на которую влияют такие факторы, как стоимость, физические возможности, свободное время и внешние ограничения, является основным фактором, определяющим качество обслуживания. В одном исследовании [7] использовалась даже гравитационная модель, включающая в себя весовой коэффициент для каждого транспортного узла, для оценки доступности местоположения:

$$A_i = \sum_j P_j \cdot f(C_{ij}), \quad (1)$$

где A_i – доступность i -й зоны; P_j – возможности достижения цели из j -й зоны; i – индекс зоны отправления; j – индекс зоны назначения $f(C_{ij})$ – функция, определяющая стоимость поездки.

В данном контексте стоимость выступает в качестве ключевого элемента, который определяет, насколько доступно то или иное место. Доступность – это многогранное понятие, на которое влияют и другие аспекты. Чтобы учесть все значимые факторы, вводится концепция импеданса, или сопротивления поездке. Это означает, что при путешествии из пункта i в пункт j может возникнуть определенная легкость или сложность в процессе перемещения.

Традиционно функция импеданса $f(d_{ij})$ рассматривает связь только с расстоянием между двумя местами. Однако это ограничение вполне можно преодолеть, добавив в расчет множество дополнительных факторов, которые также оказывают существенное влияние на уровень доступности.

Ощущение желательности местоположения усиливается по мере приближения к намеченной цели, что обусловлено принципом близости. Это «предвзятое отношение к близости» предполагает, что предпочтение отдается целям, находящимся в пределах досягаемости, из-за подсознательного расчета снижения затрат. Люди инстинктивно тяготеют к вариантам, которые обещают самый легкий путь к месту назначения.

Таким образом, истинная доступность выходит за рамки простого физического расстояния. Это многогранная концепция, сформированная динамичным взаимодействием предполагаемых затрат (времени, усилий, ресурсов), объективного расстояния и других нюансов, связанных с путешествием.

Всестороннее понимание этих элементов дает важнейшую информацию для принятия решений, позволяя усовершенствовать логистические стратегии и глубже понять модели поведения потребителей в сфере мобильности:

$$P_j^{ip} = \frac{X_j^p f(d_{ij})}{\sum_{j \in L^{ip}} X_j^p f(d_{ij})}, \quad (2)$$

где L^{ip} – набор местоположений типа p в наборе выбора для зоны i ; X_j^p – размер активности типа p (количество / мощность точек производственной активности, а также других точек притяжения пассажиропотока) в местоположении j .

Доступность, определяемая такими факторами, как стоимость, время и удобство, существенно влияет на выбор пункта назначения. По мере увеличения усилий (измеряемых стоимостью или временем), затрачиваемых на то, чтобы добраться до места, вероятность выбора этого пункта назначения уменьшается. В городских условиях это особенно актуально: потребитель с большей вероятностью откажется от поездки в пункт назначения, если посчитает, что связанные с этим затраты времени и денег не оправдывают цели. Таким образом, удобство расположения, наличие общественного транспорта и приемлемая стоимость проезда становятся ключевыми факторами при выборе, например, магазина или ресторана. Эта взаимосвязь, отраженная в моделях, подобных формуле (2), дополнительно регулируется демографией путешественников и целью поездки [8].

Указанные факторы открывают путь к использованию гравитационной модели, что позволяет провести оценку показателей качества транспортной цепочки, рассматриваемой от стартовой точки до конечного пункта назначения. При этом важно учитывать воспринимаемое качество на каждом из звеньев данной цепочки. Это значит, что функциональная форма качества транспортной услуги, обозначаемая как $f(q_{ij})$, которая зависит от восприятия качества на разных этапах транспортирования, интегрируется в общее представление о функции импеданса [9].

В этой модели предполагаем, что пользователь стремится выбрать транспортную цепочку, обладающую наивысшим интегральным показателем качества, обозначаемым как $Q_{\text{выб}}$. Таким образом, вся структура выбора оптимального маршрута и средств передвижения оказывается тесно связанной с тем, как различные параметры влияют на конечное восприятие качества услуги со стороны пассажиров, позволяя существенно увеличить оригинальность и широту анализа в этой области:

$$Q_{\text{выб}} = \max Q_i (i \in \dots, n), \quad (3)$$

где n – количество возможных транспортных цепочек от начальной до конечной точки при прямой поездке, определяющих качество Q_i , рассматриваемых индивидом (потенциальным пассажиром).

Каждая цепочка в свою очередь формируется из ряда звеньев, каждое из которых обладает уникальными характеристиками:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m q_j, \quad (4)$$

где q_j – качество отдельного j -го звена транспортной цепочки; m – число звеньев транспортной цепочки.

В наиболее простом варианте

$$Q_i = \sum_{j=1}^m q_j = \sum_{j=1}^m \sum_{k \in K} q_{jk} \cdot p_k, \quad (5)$$

где q_{jk} – показатель качества транспортной услуги j -го звена по k -му критерию; p_k – весовой коэффициент k -го критерия качества транспортной услуги, принадлежащего множеству K .

Удовлетворенность пассажиров перевозками – это хрупкий баланс, на который влияет не только расстояние, но и воспринимаемое качество обслуживания. Это качество является многогранным понятием, варьирующимся в зависимости от времени, типа пассажира и цели поездки. Ключом к пониманию и улучшению обслуживания является признание взаимосвязи показателей качества. Например, увеличение скорости может поставить под угрозу безопасность, хотя повышение комфорта или времени в пути может компенсировать это.

Эти взаимосвязи могут быть отображены в виде сетей, показывающих, как различные факторы влияют друг на друга и как меняется их важность в зависимости от групп пользователей и типов поездок (рисунки 3 и 4 для примера сетевых представлений).



Рисунок 3 – Специфические аспекты взаимосвязи параметров воспринимаемого качества транспортного сервиса



Рисунок 4 – Иллюстрация взаимосвязи факторов, влияющих на восприятие качества транспортного сервиса

Моделируя удовлетворенность пользователей как динамичное многомерное пространство, где каждое измерение представляет собой показатель качества, специалисты по планированию перевозок могут получить более полное представление о нюансах и оптимизировать предоставление услуг:

$$S = \sum_{i=1}^k \frac{a_i \times x_i}{x_i}, \quad (6)$$

где S – индекс удовлетворенности; a_i – оценка удовлетворенности по атрибуту; x_i – относительная важность атрибута $i = 1, \dots, k$.

Чтобы по-настоящему оценить эффективность транспортных услуг, крайне важен целостный подход, ориентированный на пользователя. Использование интервальной математики позволяет лучше понять настроения пользователей, фиксируя диапазоны оценок и выявляя проблемные области. Рассчитывая общий показатель удовлетворенности, учитывающий различные демографические характеристики (например, возраст, местоположение), операторы могут определить конкретные проблемные точки и адаптировать улучшения [10]. Сопоставление показателей удовлетворенности с такими осязательными факторами, как продолжительность поездки на работу и уровень комфорта, позволяет на основе данных повысить качество обслуживания, что в конечном итоге повышает удовлетворенность пользователей.

Транспортные системы должны стремиться к работе в рамках «зоны приемлемости», определяемой ожиданиями пользователей, избегая как избыточности функций, так и несоответствия минимальным стандартам. Оптимизация ресурсов должна быть направлена на

повышение качества обслуживания для удержания пассажиров и повышения привлекательности общественного транспорта. Индивидуальные «пороговые значения допустимости» влияют на выбор маршрутов и видов транспорта, формируя основу оптимальной стратегии путешествия пользователя. Городам следует уделять приоритетное внимание удовлетворению потребностей пассажиров при планировании, разработке и мониторинге транспортных систем, смещая акцент с личного транспорта на общественный для снижения пробок и воздействия на окружающую среду. «Гравитационная модель», основанная на стремлении пользователей к пути наименьшего сопротивления (высочайшего качества обслуживания), предоставляет ценную основу для анализа и оптимизации. Комплексный показатель качества, отражающий это «сопротивление», позволяет транспортным властям выявлять области для улучшения маршрутов, управления транспортными средствами и тарифной политики, обеспечивая максимальное положительное влияние на услуги городского транспорта и улучшение качества жизни горожан. В перспективе такой подход позволяет точно улучшать проблемные участки транспортной системы, делая ее более привлекательной и конкурентоспособной, что, в свою очередь, способствует устойчивому развитию городов и повышению мобильности населения. Применение данного подхода может быть особенно эффективно в густонаселенных городских районах с развитой инфраструктурой, где существует возможность перераспределения ресурсов и оптимизации существующих маршрутов общественного транспорта.

Список литературы

1. Маркетинговый подход к управлению качеством транспортного обслуживания / А. М. Асалиев, Н. Б. Завьялова, О. В. Сагинова [и др.] ; под ред. Н. Б. Завьяловой, О. В. Сагиновой, И. В. Спирина. – Новосибирск : Общество с ограниченной ответственностью «Центр развития научного сотрудничества», 2016. – 172 с. – текст : непосредственный. – EDN VVQZBP.
2. Донченко, В. В. Доступность и методы её оценки в процессах планирования городских транспортных систем / В. В. Донченко. – текст : электронный // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2023. – № 1 (35). – EDN TGTHFA. – URL: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1203/pdf_705 (дата обращения: 10.03.2025).
3. Жук, А. Е. Ценностно-ориентированное развитие логистических систем городского общественного пассажирского транспорта : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Жук Андрей Евстафьевич ; Санкт-Петербургский государственный экономический университет. – Санкт-Петербург, 2021. – 245 с. – текст : непосредственный.
4. Волкова, И. Н. Проблемы и перспективы территориальной организации и территориального планирования региональной транспортной системы (на примере Свердловской области) / И. Н. Волкова, П. М. Крылов, М. Ю. Евдокимов. – текст : непосредственный // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2022. – Т. 32. – № 2. – С. 192–204. – DOI 10.35634/2412-9518-2022-32-2-192-204. – EDN MZCCMQ.
5. Пути повышения эффективности функционирования транспортной системы городской агломерации / Т. В. Коновалова, С. Л. Надирян, И. Н. Котенкова, С. В. Коцурба. – текст : непосредственный // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2023. – № 9. – С. 220–224. – DOI 10.23672/SAE.2023.9.9.016. – EDN AOUHTS.
6. Формирование конкурентной среды на примере транспортного потенциала методом организации поточного следования пассажиров на основе принципа «сухие ноги» / Т. М. Шманев, В. И. Ульяницкая, М. С. Горбунова [и др.]. – текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 2. – С. 333–344. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-2-333-344. – EDN CTIQOG.

7. Сафиуллин, Р. Н. Методы внедрения систем удаленного диагностирования пассажирского транспорта в городских агломерациях / Р. Н. Сафиуллин, Р. Р. Сафиуллин, К. В. Сорокин. – текст : непосредственный // технико-технологические проблемы сервиса. – 2023. – № 4 (66). – С. 18–24. – EDN FXOCET.

8. Аубакиров, Р. Разработка ГИС для моделирования распространения концентрации в городских условиях // eciense.ru : сайт. – текст : электронный. – Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. – 2024. – № 2. – URL: <https://eciense.ru/ru/nauka/article/86519/view> (дата обращения: 10.03.2025).

9. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В. Н. Козловский, Д. И. Благовещенский, Д. В. Айдаров [и др.]. – текст : непосредственный // Стандарты и качество. – 2022. – № 7. – С. 36–42. – EDN EQAUOT.

10. Развитие рынка электромобилей в России как необходимое условие получения выгод от глобального тренда на электрификацию транспорта / В. В. Семикашев, А. Ю. Колпаков, А. А. Яковлев, Й. К. Ростовский. – текст : непосредственный // Проблемы прогнозирования. – 2022. – № 3 (192). – С. 52–63. – DOI 10.47711/0868-6351-192-52-63. – EDN YRSTXP.

References

1. Asaliev A.M., Zav"ialova N.B., Saginova O.V. et. al. *Marketingovyi podkhod k upravleniiu kachestvom transportnogo obsluzhivaniia* [Marketing approach to transport service quality management]. Novosibirsk, LLC "Scientific Cooperation Development Center" Publ., 2016, 172 p. EDN VVQZBP. (In Russian).

2. Donchenko V.V. Accessibility and methods of its assessment in urban transport systems planning. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura – Car. Road. Infrastructure*, 2023, no. 1(35). Available at: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/1203/pdf_705 (accessed 10.03.2025). EDN TGTHFA. (In Russian).

3. Zhuk A.E. *Tsennostno-orientirovannoe razvitie logisticheskikh sistem gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta* (Value-oriented development of logistics systems of urban public passenger transport). Doctor's thesis, Saint Petersburg, St. Petersburg State University of Economics, 2021, 245 p. (In Russian).

4. Volkova I.N., Krylov P.M., Evdokimov M.Yu. Problems and prospects of territorial organization and territorial planning of regional transport system (a case study of the Sverdlovsk region). *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle – Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2022, vol. 32, no. 2, pp. 192-204. DOI 10.35634/2412-9518-2022-32-2-192-204. EDN MZCCMQ. (In Russian).

5. Konovalova T.V., Nadiryana S.L., Kotenkova I.N., Kotsurba S.V. Ways to improve the efficiency of the urban agglomeration transport system. *Gumanitarnye, socialno-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki – Humanities, socio-economic and social sciences*, 2023, no. 9, pp. 220-224. DOI 10.23672/SAE.2023.9.9.016. EDN AOUHTS. (In Russian).

6. Shmanev T., Ul'yanickaya V., Gorbunova M., Sitnikov A., Fedorova N. Formation of a competitive environment on the example of transport potential by the method of organizing passenger flow based on “dry feet” principle. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia – Proceedings of Petersburg transport university*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 333-344. DOI 10.20295/1815-588X-2022-19-2-333-344. EDN CTIQOG. (In Russian).

7. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V. Methods of implementation of systems of remote diagnostics of passenger transport in urban agglomerations. *Technico-tehnologicheskie problemy servisa – Technical and technological problems of the service*, 2023, no. 4(66), pp. 18-24. EDN FXOCET. (In Russian).

8. Aubakirov R. Development of a geoinformation system for modeling concentration distribution in urban environments. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologii Integral – International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral*, 2024, no. 2. Available at: <https://eciense.ru/ru/nauka/article/86519/view> (accessed 10.03.2025). (In Russian).

9. Kozlovskiy V.N., Blagoveshchenskiy D.I., Aydarov D.V., Panyukov D.I., Farisov R.D. The concept of comprehensive improvement program methodology. *Standarty i kachestvo – Standards and Quality*, 2022, no. 7, pp. 36-42. EDN EQAUOT. (In Russian).

10. Semikashev, V. V., Kolpakov, A. Y., Yakovlev, A. A., & Rostovski, J. K. (2022). Development of the electric vehicles market in Russia as a necessary condition for benefiting from the global trend towards transport electrification. *Studies on Russian Economic Development*, 33(3), 274-281. DOI 10.1134/S1075700722030133. EDN FYUIWM.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аветисян Артур Сергеевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрННТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехника», ИрННТУ.

Тел.: +7 (9500) 87-52-49.

E-mail: avetisyan_geven@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Avetisyan Arthur Sergeevich

Irkutsk National Research Technical University (IRNTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Master's student of the department "Power Supply and Electrical Engineering", IRNTU.

Phone: +7 (9500) 87-52-49.

E-mail: avetisyan_geven@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аветисян, А. С. Методологические основы оценки качества транспортного сервиса для нужд городского планирования / А. С. Аветисян. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 87 – 96.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Avetisyan A.S. Methodological foundations for assessing the quality of transport services for the needs of urban planning. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 87-96. (In Russian).

УДК 656.073.72

К. А. Калинин, Д. В. Изюмников

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК В КРУПНЫХ АГЛОМЕРАЦИЯХ ЧЕРЕЗ ПРИОРИТЕТНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ЗАЯВОК

Аннотация. В статье рассматриваются методы оптимизации управления транспортными потоками в крупных агломерациях путем применения методов кластеризации, маршрутизации и принципов теории массового обслуживания. Основное исследование посвящено перераспределению ресурсов за счет внедрения системы приоритетов в обработке заявок. Проанализировано влияние таких параметров, как срочность, плотность и пропускная способность грузопотока на работу системы и предложены алгоритмы оптимизации для сокращения времени ожидания, снижения затрат и повышения эффективности транспортных процессов.

Методология исследования включает в себя применение многоканальной модели массового обслуживания для оценки влияния приоритетного распределения заявок на пропускную способность системы. Для анализа перераспределения ресурсов использованы математическое моделирование, методы линейного программирования и расчет NPV для оценки экономической эффективности.

Результаты исследования подтверждают, что внедрение системы приоритетного обслуживания заявок позволяет сократить время ожидания для срочных грузов. Определены зависимости между уровнем загрузки ресурсов и долей приоритетных заявок в потоке. Разработанный алгоритм перераспределения ресурсов корректирует загрузку транспортной системы в условиях изменяющейся интенсивности потоков. Расчеты показали, что при высокой загрузке системы увеличение доли приоритетных заявок может привести к росту времени ожидания менее приоритетных клиентов, что требует поиска оптимального показателя P_i для соблюдения баланса нагрузки. Применение предложенных методов позволило сократить среднее время ожидания приоритетных заявок в 1,5 – 2 раза в зависимости от сценария, а также подтвердило экономическую эффективность решений за счет положительного значения NPV. Оптимизированное перераспределение ресурсов способствует снижению затрат на обслуживание и сокращению совокупных операционных расходов.

Практическая значимость исследования заключается в повышении эффективности транспортных процессов за счет динамического перераспределения ресурсов. Внедрение предложенных методов может применяться в логистике и транспортных компаниях для оптимизации обработки заявок, улучшения клиентского сервиса и сокращения затрат.

Ключевые слова: управление процессами перевозок, городские агломерации, теория массового обслуживания, система приоритетных заказов, пропускная способность транспортных систем, экономическая эффективность логистики, цифровизация логистики, автоматизация транспортных процессов, CRM-системы.

Kirill A. Kalinin, Denis V. Izyumnikov

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

INCREASING THE EFFICIENCY OF TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT IN LARGE AGGLOMERATIONS THROUGH PRIORITY SERVICING OF INCOMING APPLICATION FLOW

Abstract. The article considers methods for optimizing traffic flow management in large agglomerations by using clustering, routing and principles of queuing theory. The main study is devoted to the redistribution of resources by introducing a priority system in request processing. The influence of urgency, density and throughput of cargo flow on the system operation is analyzed and optimization algorithms are proposed to reduce waiting time, reduce costs and improve the efficiency of transport processes.

The research methodology includes the use of a multi-channel queuing model to assess the impact of priority distribution of requests on the system throughput. Mathematical modeling, linear programming methods and NPV calculation for assessing economic efficiency are used to analyze the redistribution of resources.

The results of the study show that the priority service system reduces the waiting time for urgent requests, but under high load it can increase the waiting time for less priority clients. The developed resource redistribution algorithm adapts the system to changes in flow intensity. The use of the proposed methods made it possible to reduce the average waiting time for priority requests by 1.5–2 times and reduce operating costs.

The practical significance of the study lies in increasing the efficiency of transport processes due to the dynamic redistribution of resources. The implementation of the proposed methods can be used in logistics, courier services and transport companies to optimize the processing of requests, improve customer service and reduce costs.

Keywords: transport process management, urban agglomerations, queueing theory, priority order system, transport system capacity, economic efficiency of logistics, digitalization of logistics, automation of transport processes, CRM-systems.

Текущее развитие рынка транспортно-логистических услуг в условиях функционирования крупных агломераций сталкивается с новыми проблемами и задачами, в частности, с ростом электронной торговли, наблюдающимся последние пять лет и его влиянием на развитие транспортных операций [1]. Значительная часть рынка электронной торговли представлена перевозками мелкопартийных типов грузов [2]. Из особенностей развития можно отметить также увеличение количества скорых доставок и требований к сокращению общего времени в пути в крупных агломерациях [3]. Данная специфика напрямую влияет на применение новых методов управления процессами перевозок и на эффективность их функционирования.

Значительную роль в решении текущих проблем и задач играет внедрение цифровизации и новых методов маршрутизации и кластеризации грузополучателей [4]. Рассматривая комбинированный подход к решению данных проблем, можно найти эффективное решение, удовлетворяющее текущие потребности, а именно внедрение современных цифровых систем управления транспортными процессами [5]. Можно отметить и рост разнообразия продуктов, связанных с цифровизацией логистических процессов, развитие таких систем: BPM (Business Process Management – система управления бизнес-процессами), CRM (Customer Relationship Management – система управления взаимоотношениями с клиентами) и ERP (Enterprise Resource Planning – система управления ресурсами предприятия). Внедрение данных продуктов позволяет автоматизировать управление складскими, транспортными, управленческими, финансовыми и другими процессами, что отражается на повышении общей эффективности. В частности, применение современных CRM-систем позволяет автоматизи-

ровать работу с клиентским сервисом, складским или транспортным учетом, финансовыми и транспортными операциями [6]. Интеграция с другими сервисами или системами позволяет выстроить замкнутую систему управления процессами предприятия, что также отражается на общей цифровизации процессов.

Применение программных продуктов, связанных с транспортным управлением, также имеет значительный эффект при повышении уровня сервиса предприятий. Программные продукты позволяют автоматизировать нахождение эффективных маршрутов доставки, группировать грузополучателей по различным признакам и вести контроль за выполнением перевозок.

В рамках исследования поставлена задача эффективного управления транспортными процессами на территории крупных агломераций. В качестве решения предложены применение и доработка существующего метода кластеризации DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise – основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами). Дополнительной доработкой является учет весов дополнительных факторов, задаваемых предприятием для учета весовой нагрузки точки доставки, т. е. важности грузополучателя. Комплексное применение кластеризации и маршрутизации доставок внутри получившихся зон или кластеров позволяет выстроить эффективную сеть маршрутов с учетом ряда дополнительных факторов и расстояния доставки.

В качестве дополнительного решения предложено применение принципов теории массового обслуживания, в частности, учета эффективности работы с входящим потоком заявок [7]. Разработаны алгоритм определения модели массового обслуживания, алгоритм работы с входящим потоком заявок и его последовательность и методика перераспределения ресурсов, их учет и зависимости от интенсивности поступающего потока заявок.

Дальнейшие результаты исследования и предложенные решения позволяют сформировать комплексный подход к решению проблемы эффективного управления транспортными потоками.

Рассматривая применение принципов теории массового обслуживания в вопросе оптимизации транспортных потоков на территории крупных агломераций и при работе с входящим потоком заявок, необходимо отметить вариативность различных типов поступающих заявок. Здесь можно выделить типовое деление заявок по различным видам грузов, срочности доставки, требованиям к безопасности перевозки и другим критериям. В связи с данной спецификой было предложено применение приоритетности в работе с заявками [8].

Для этого был определен перечень заявок, относящихся к типу приоритетных: срочные заявки, заявки от приоритетных клиентов и грузы с ограниченными сроками хранения. Расчет проводится по формуле:

$$P_i = \frac{S_i}{T_i}, \quad (1)$$

где P_i – приоритет заявки i ;

S_i – срочность заявки i ;

T_i – допустимое время доставки для заявки i , мин.

Заявки с наивысшим показателем P_i , соответственно, будут обработаны в первую очередь.

Модели массового обслуживания с несколькими транспортными и складскими единицами могут быть адаптированы для учета работы с приоритетными заявками от клиентов. Для этого необходимо уменьшить время ожидания для данного типа заявок, что в свою очередь может быть достигнуто путем перераспределения ресурсов и корректировки скорости обслуживания. Для расчета применима формула:

$$W_q^p = \frac{P_i \cdot \lambda_p}{\mu(\mu - P_i \cdot \lambda_i)}, \quad (2)$$

где W_q^p – среднее время ожидания приоритетных заявок, мин;

Управление процессами перевозок

λ_p – интенсивность поступления приоритетных заявок, заявок в час;

μ – интенсивность обслуживания, заявок в час;

P_i – приоритет заявки i .

Вероятность уменьшения времени ожидания для заявок с приоритетом определяется по формуле:

$$\Delta W = W_q - W_q^p. \quad (3)$$

Данный показатель определяет разницу снижения времени ожидания при внедрении системы приоритетов.

Для практического расчета степень приоритетности была рассмотрена в диапазоне от 1,2 до 2,8, а также приняты следующие показатели: $\lambda = 10$ заявок в час при отсутствии приоритета; $\lambda_{\text{приоритет}} = 5$ заявок в час с приоритетом; $\mu = 15$ заявок в час (интенсивность обслуживания).

Результаты проведенного расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета среднего времени ожидания с учетом диапазона показателя степени приоритетности

Степень приоритетности P_i	Среднее время ожидания, мин.	Уменьшение времени ожидания, мин
1,2	0,04	0,09
1,4	0,06	0,08
1,6	0,08	0,06
1,8	0,1	0,03
2,0	0,13	0,0
2,2	0,18	-0,05
2,4	0,27	-0,13
2,6	0,43	-0,3
2,8	0,93	-0,8

Построены графики зависимости среднего времени ожидания от степени приоритетности и влияния степени приоритета на уменьшение времени ожидания (рисунки 1, 2).

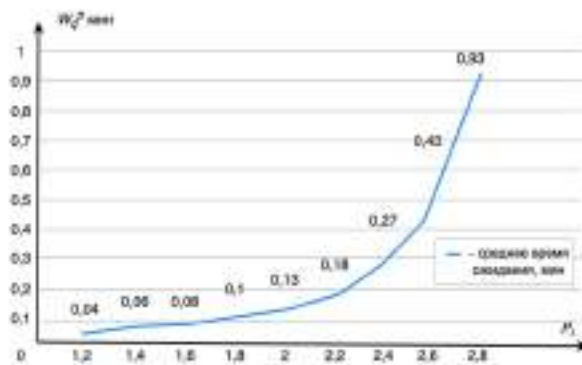


Рисунок 1 – График зависимости среднего времени ожидания от степени приоритетности

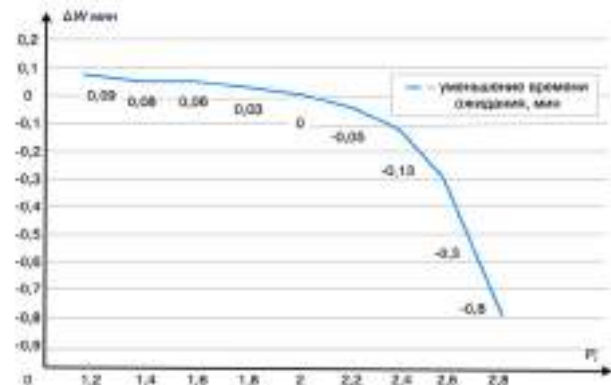


Рисунок 2 – Влияние степени приоритета на уменьшение времени ожидания

С точки зрения определения оптимального размера степени приоритетности можно сделать вывод о том, что наибольший эффект достигается при показателе 1, наименьший – при показателе 2,8, а пороговое значение будет равно 0, т. е. показатель степени приоритетности выше 2,0 является неэффективным.

Для проведения дополнительных расчетов с целью получения зависимости среднего времени ожидания от интенсивности потока заявок были выбраны определенные показатели.

Управление процессами перевозок

Результаты расчетов среднего времени ожидания от показателя интенсивности потока заявок приведены в таблице 2, график зависимости среднего времени ожидания от интенсивности потока заявок приведен на рисунке 3.

Таблица 2 – Показатели для построения графика зависимости среднего времени ожидания от интенсивности потока заявок

Показатель интенсивности потока заявок λ	Среднее время ожидания для заявок без приоритета, ч	Среднее время ожидания для заявок с приоритетом, ч
2	0,0102	0,0333
4	0,0242	
6	0,0444	
8	0,0993	
10	0,1333	
12	0,2666	
14	0,761	

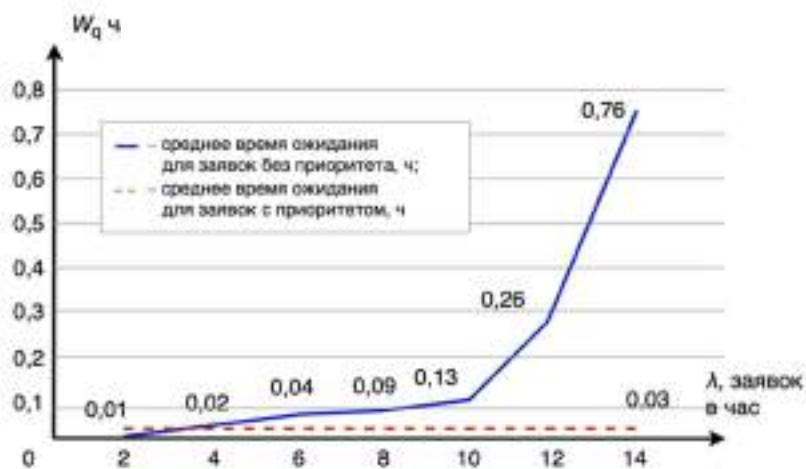


Рисунок 3 – График зависимости среднего времени ожидания от интенсивности потока заявок

Стоит отметить важность учета пропускной способности при внедрении системы приоритетов. Это может повлиять на общую пропускную способность за счет того, что приоритетные заявки обслуживаются в первую очередь, а это отражается на замедлении обработки менее срочных заявок.

Формула расчета пропускной способности с учетом внедрения приоритетов имеет вид:

$$C = \frac{n}{T_{\text{общее}}}, \quad (4)$$

где C – общая пропускная способность системы;

n – общее количество обслуживаемых заявок;

$T_{\text{общее}}$ – общее время на обслуживание всех заявок.

Как следствие, внедрение системы приоритетов отражается на снижении времени ожидания для приоритетных заявок, а значит, системой может быть рассмотрено больше таких заявок за определенную единицу времени. С другой стороны, происходит увеличение времени ожидания для неприоритетных заявок, что также отражается на их уменьшении в обслуживании.

Следующим этапом будет являться корректировка параметров обслуживания, т. е. необходимо на основании перерасчета характеристик обслуживания адаптировать параметры на работу с заявками.

Для заявок с приоритетами необходимо внедрить решения, направленные на ускорение процессов: выделение дополнительных складских мощностей, использование транспортных средств с большей скоростью доставки.

Плотность кластера и пропускная способность должны быть пересчитаны для тех систем, где внедрено приоритетное обслуживание.

Расчет будет проходить по формуле:

$$D_{\text{приоритет}} = \frac{R_{\text{приоритет}}}{A_{\text{приоритет}}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{приоритет}}$ – плотность заявок с приоритетами в кластере;

$R_{\text{приоритет}}$ – количество приоритетных заявок;

$A_{\text{приоритет}}$ – доступные ресурсы для приоритетных заявок.

Для проведения моделирования различных сценариев работы транспортной системы с учетом приоритетных заявок была рассмотрена многоканальная система массового обслуживания [9]. Для расчета были использованы следующие параметры: различные уровни срочности, степень загрузки системы и количество устройств.

Для учета эффективности приведены следующие показатели: среднее время ожидания заявок с разными приоритетами; степень загрузки системы при разном уровне приоритетов; пропускная способность системы. Для определения вероятности отказа для систем с ограниченным числом каналов обслуживания использована формула Эрланга:

$$P_{\text{отказов}} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} \cdot \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{k!}}, \quad (6)$$

где n – рассматриваемое количество каналов обслуживания;

k – рассматриваемое количество одновременно обслуживаемых заявок;

λ – интенсивность входящего потока заявок;

μ – интенсивность обслуживания одной заявки.

В качестве результатов приведен сравнительный анализ трех сценариев с учетом заданных условий, указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Итоговые показатели критериев для трех сценариев и их условия.

Критерий	Вариант сценария		
	первый	второй	третий
Условия	Высокий процент приоритетных заявок, мала загрузка системы	Умеренный процент приоритетных заявок, высокая загрузка системы	Низкий процент приоритетных заявок, высокая загрузка
Время ожидания заявок с приоритетом	10 мин	8 мин	6 мин
Время ожидания заявок без приоритета	23 мин	21 мин	27 мин
Пропускная способность	Высокая	Высокая	Высокая
Процент отказа неприоритетным заявкам	Низкий (10 %)	Средний (27 %)	Высокий (35 %)

Результаты расчета времени ожидания заявок по трем сценариям с учетом приоритетных и неприоритетных заявок представлены на рисунке 4.

Таким образом, полученные результаты по сценарию 1 показывают, что система работает с достаточной эффективностью, с низким временем ожидания для двух сравниваемых вариантов, а также с минимальным процентом отказов. Данный вариант более подходит для обеспечения равномерного обслуживания заявок с минимальными задержками, но стоит также учесть, что он наиболее эффективен только при низкой загрузке.

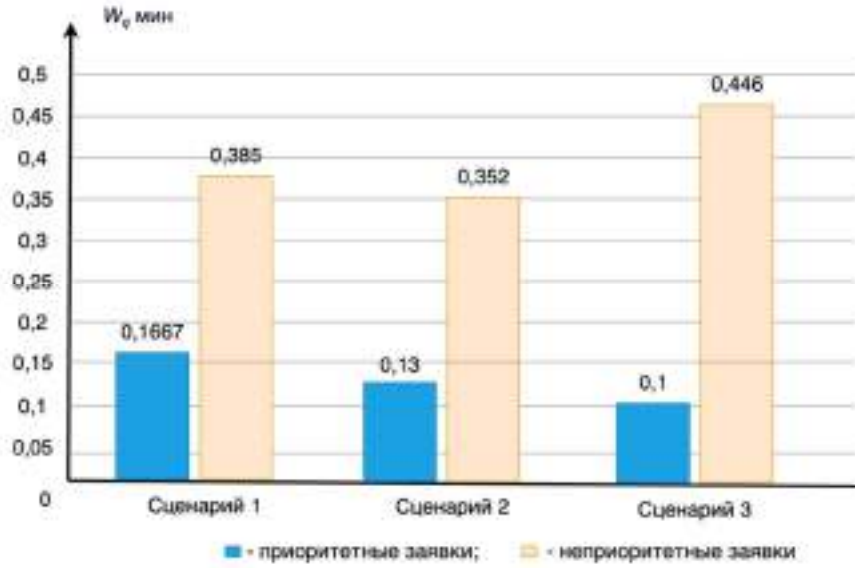


Рисунок 4 – Результаты расчета времени ожидания заявок по трем сценариям, ч

Сценарий 2 демонстрирует растущую нагрузку, однако уровни ожидания и отказов еще находятся в эффективном положении. Одними из предложений по повышению уровня эффективности будут являться повышение пропускной способности и увеличение количества обслуживающих устройств.

Сценарий 3 показывает наибольшую нагрузку среди всех сценариев на заявки без приоритета, повышая время ожидания и процент отказов. В данном случае решительно необходимы изменения в количестве дополнительных ресурсов для повышения эффективности.

Стоит отметить наличие возможных улучшений и эффективности при использовании системы приоритетов и маршрутизации в управлении процессами перевозок. Основной целью будет являться сокращение общего времени доставки грузов или товаров в рамках кластера или системы через комбинацию методов приоритетности заказов и оптимизации маршрутов.

Основными параметрами или критериями будут являться следующие:

$T_{\text{базовое}}$ – базовое время доставки без учета системы приоритетов;

$T_{\text{обр}}$ – среднее время, предназначенное для обработки одного заказа;

$T_{\text{пути}}$ – среднее время в пути между двумя пунктами доставки;

$T_{\text{разгрузки}}$ – время, предназначенное на операции, связанные с разгрузкой;

P – доля заявок, отнесенных к приоритетным.

Методы расчета времени представлены в таблице 4.

Для определения общего процента улучшения показателей был введен коэффициент оборачиваемости $K_{\text{обр}}$, который позволит определить эффективность до и после оптимизации:

$$K_{\text{обр}} = \frac{T_{\text{базовое}}}{T_{\text{опт общ}}} \quad (7)$$

Чем выше будет значение коэффициента, тем лучше оборачиваемость.

Таблица 4 – Методы расчета времени с целью сокращения общего времени доставки

Наименование формулы	Расчет
Общее время доставки для одной заявки T_i	$T_{i \text{ базовое}} = T_{\text{обр}} + T_{\text{пути}} + T_{\text{разгрузки}}$
В случае внедрения решения, связанного с приоритетностью обслуживания части заявок, часть заявок будет обозначена как P , а среднее время обработки данных заявок на $X\%$ меньше обычного	$T_{\text{пр обр}} = T_{\text{обр}} \cdot (1 - x)$
Среднее время обработки всех заявок с учетом системы приоритетов	$T_{\text{общ обр}} = P \cdot T_{\text{пр обр}} + (1 - P) \cdot T_{\text{обр}}$
Итоговое время доставки в пути сокращается ввиду оптимизации маршрутов, тогда общее время снизится, к примеру, на $Y\%$	$T_{\text{опт пути}} = T_{\text{пути}} \cdot (1 - y)$
Общее время доставки после внедрения изменений	$T_{\text{опт общ}} = T_{\text{обр общ}} + T_{\text{опт пути}} + T_{\text{разгрузки}}$
Экономия времени рассчитывается как разница между временем базовым и общим временем после оптимизации	$\Delta T = T_{\text{базовое}} - T_{\text{опт общ}}$

Для определения эффективности принимаемых решений важно отметить финансовые и экономические показатели до и после внедрения. Данный этап будет включать в себя экономический эффект от перераспределения ресурсов, учет транспортных показателей и определение экономического эффекта от оптимизации [10].

Оценка и анализ экономической эффективности включает в себя несколько требований, которые необходимо учесть – это снижение затрат, увеличение выручки и влияние на транспортные показатели, а именно время в пути и заполняемость транспортных средств.

1. Снижение затрат на выполнение заявок.

Снижение коэффициента отказов вносит свой результат в снижение затрат. Для его расчета можно применить формулу:

$$C_{\text{снижение затрат}} = C_{\text{отказы}} \cdot (1 - P_{\text{отказы}}) \cdot C_{\text{стоимость заявки}}, \quad (8)$$

где $C_{\text{отказы}}$ – общее количество заявок;

$P_{\text{отказы}}$ – вероятность отказов;

$C_{\text{стоимость заявки}}$ – стоимость обработки одной заявки.

Для расчета числа выполненных заявок необходимо учитывать данные изменения в пропускной способности системы посредством формулы:

$$C_{\text{выполненные}} = C_{\text{заявок}} \cdot (1 - P_{\text{отказы}}) \cdot (1 + \Delta P), \quad (9)$$

где ΔP – прирост пропускной способности после оптимизации работы системы.

Выручка от транспортировки и дополнительных доходов подразумевает под собой зависимость от общего числа выполненных заявок и среднего дохода от одной заявки и рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{выручки}} = C_{\text{выполненные}} \cdot C_{\text{средний доход}} \quad (10)$$

2. Учет транспортных показателей.

При проведении анализа и оценки экономической эффективности следует учитывать транспортные показатели скорости доставки и заполняемости транспортных средств.

Скорость доставки: улучшение логистических операций и процессов напрямую влияет на повышение общего числа выполненных заявок и задач и, как следствие, приводят к увеличению выручки.

Заполняемость транспортных средств: этот показатель также влияет на экономическую эффективность посредством учета загруженности транспортной единицы грузом: чем больше средство загружено, тем больше снижаются затраты на транспортировку.

Для расчета средней заполняемости необходимо провести расчет по формуле:

$$Z = \frac{C_{\text{заявки}}}{C_{\text{вместимость ТС}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где $C_{\text{заявки}}$ – общее количество заявок, обработанных за определенный период времени;

$C_{\text{вместимость ТС}}$ – совокупная вместимость транспортных средств (ТС), участвующих в выборке по указанным заявкам.

3. Определение экономического эффекта.

Экономический эффект от оптимизации и предлагаемых решений можно выразить в виде:

$$C_{\text{экон}} = C_{\text{сниж. затрат}} + C_{\text{увелич. выручки}} - C_{\text{перераспр. затрат}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{перераспр. затрат}}$ – затраты, связанные с внедрением изменений в текущую деятельность организации.

Практический расчет будет включать в себя несколько этапов: снижение затрат и определение затрат на выполнение одной заявки до и после оптимизации, увеличение выручки, снижение затрат на перераспределение и расчет итогового экономического эффекта.

Для оценки эффективности предлагаемых решений было принято применить динамическую модель оценки чистой приведенной стоимости (*NPV – Net Present Value*):

$$NPV = \sum_1^n \frac{P_t}{(1+i)^t} - I, \quad (13)$$

где *NPV* – метод оценки доходности с учетом дисконтирования;

n – временной отрезок, за который производится расчет;

P_t – денежный поток за интервал времени;

i – ставка дисконтирования;

I – инвестиционные затраты.

Для дальнейшего расчета принято, что экономия от оптимизации будет продолжаться в течение пяти лет. Ставка дисконтирования принята в размере 10 %.

Итоговый результат по каждому году указан в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчета чистой приведенной стоимости

Год	<i>NPV</i> для каждого года, руб.
1	818 000
2	743 636
3	675 960
4	613 600
5	557 800
Итого с учетом затрат на внедрение	3 205 996

Чистая приведенная стоимость проекта составляет 3 205 996 руб., что свидетельствует о высокой экономической эффективности предложенных изменений и подтверждает целесообразность инвестиций в проект с учетом предложенной оптимизации.

Экономическая эффективность от предлагаемых решений составит 900 800 руб., что позволит оптимизировать бюджет компании, сократив затраты на выделенную статью бюджета, и подтвердит целесообразность предлагаемых изменений. Полученный результат окупаемости затраченных финансовых ресурсов довольно быстро окупается за 2,2 месяца, что свидетельствует об эффективности предлагаемых решений.

Внедрение системы приоритетного обслуживания заявок позволяет значительно сократить время ожидания доставок со срочным типом. Однако этот подход приводит к увеличению времени обработки менее приоритетных заказов, что требует поиска оптимального баланса в распределении ресурсов. Проведенное моделирование различных сценариев работы транспортной системы продемонстрировало, что высокая доля приоритетных заявок требует увеличения ресурсов, иначе при недостатке мощностей возрастает процент отказов на обслуживание менее приоритетных заказов.

Для решения этой проблемы целесообразно применять алгоритмы перераспределения ресурсов, которые позволяют снизить вероятность перегрузки системы, оптимизировать загрузку транспортных и складских мощностей и повысить общую пропускную способность логистических процессов. Внедрение предложенных методов управления приводит к снижению затрат на транспортные операции, повышению уровня клиентского сервиса и общей эффективности работы транспортных компаний.

Анализ экономической эффективности подтверждает, что использование данных решений способствует сокращению операционных расходов, снижению коэффициента отказов и повышению оборачиваемости ресурсов. Однако для дальнейшего развития исследования важно учитывать сезонные колебания грузопотоков, а также интегрировать предложенные алгоритмы с цифровыми системами управления перевозками, такими как TMS, WMS и CRM. Разработка адаптивных моделей маршрутизации в условиях изменяющегося спроса станет следующим шагом в повышении эффективности логистических процессов.

Список литературы

1. Маркетинговое исследование Интернет-торговля в России 2024 // datainsight.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2023 (дата обращения: 10.06.2024).
2. Поспелова, П. В. Развитие и совершенствование мультимодальных грузовых перевозок транспортной компании на примере ООО «Деловые линии» / П. В. Поспелова, Е. В. Файзрахманова. – Текст : непосредственный // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2023. – № 4 (70). – С. 97–103. – EDN ZHENLE.
3. Московский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский [и др.]. – Москва : ВИНТИ РАН, 2017. – Часть II. – 96 с. – Текст : непосредственный. – EDN PVRCVO.
4. Мазурина, А. В. Цифровая трансформация логистики «последней мили»: теоретический анализ / А. В. Мазурина, Т. В. Степанова. – Текст : непосредственный // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Экономика и управление. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 50–60. – EDN WCQWHS.
5. Клычева, Н. А. Эффективность внедрения цифровых моделей в области грузовых перевозок / Н. А. Клычева, Е. С. Прокофьева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 110–118. – EDN PGOYHU.
6. Изюмников, Д. В. Оценка эффективности внедрения CRM-системы в деятельность организации в сфере транспортно-логистического рынка услуг / Д. В. Изюмников, С. П. Вакуленко, Д. Ю. Роменский. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2024. – № 1. – С. 21–38. – EDN НКWRQM.
7. Максимова, Н. Н. Теория систем массового обслуживания и ее приложения / Н. Н. Максимова, О. И. Сергамасова. – Текст : непосредственный // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2012. – № 59. – С. 17–25. – EDN PZDDMV.
8. Черткова, Т. В. Роль приоритетного обслуживания в оптимизации управления транспортными процессами / Т. В. Черткова. – Текст : непосредственный // Проблемы развития транспортной инфраструктуры европейского севера России : материалы межрегиональной научно-практической конференции, Котлас, 20 марта 2003 г. / отв. редактор С. А. Гладких / Котласский филиал Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций. – Котлас, 2003. – Выпуск 1. – С. 32–37. – EDN VHVKDD.

9. Жарков, М. Л. К вопросу о применении теории массового обслуживания при моделировании работы железнодорожных станций / М. Л. Жарков, А. Л. Казаков, А. Л. Лемперт. – Текст : непосредственный // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2021) : материалы международной научной конференции, Москва, 20 – 24 сентября 2021 г. / под общ. ред. В. М. Вишневецкого, К. Е. Самуйлова / Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва, 2021. – С. 263–268. – DOI 10.25728/dccn.2021.038. – EDN LCZEBX.

10. Панченко, Ю. Ю. К вопросу оценки экономической эффективности интеграции железнодорожного транспорта в цифровую экономику / Ю. Ю. Панченко. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2021. – № 62. – С. 40–46. – EDN BVSYGD.

References

1. *Marketingovoe issledovanie Internet-torgovlia v Rossii 2024* [Marketing research Internet trade in Russia 2024]. Available at: https://datainsight.ru/eCommerce_2023 (accessed 10.03.2025).

2. Pospelova P.V., Fayzrakhmanova E.V. Development and improvement of multimodal freight transportation of a transport company on the example of LLC "Business lines". *Innovatsionnaia ekonomika: perspektivy razvitiia i sovershenstvovaniia – Innovative economy: prospects for development and improvement*, 2023, no. 4(70), pp. 97-103. EDN ZHEHLE. (In Russian).

3. Vakulenko S.P., Kolin A.V., Romenskii D.Iu., Sviridenkov V.E., Chekmarev A.E. *Moskovskii transportnyi uzel: perspektivy razvitiia* [Moscow Transport Hub: Development Prospects]. Moscow: VINITI RAN Publ., 2017, Part II, 96 p. EDN PVRCVO. (In Russian).

4. Mazurina A.V., Stepanova T.V. Digital Transformation of “Last Mile” Logistics: A Theoretical Analysis. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Ekonomika i upravlenie – Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Economics and Management*, 2022, no. 4, pp. 50-60. EDN WCQWHS. (In Russian).

5. Klycheva N.A., Prokofieva E.S. Efficiency of digital models implementation in the field of freight transport. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2019, no. 3(39), pp. 110-118. EDN PGOYHU. (In Russian).

6. Izyumnikov D.V., Vakulenko S.P., Romenskii D.Iu. Evaluation of the effectiveness of implementing a CRM system in the activities of an organization in the transport and logistics services market. *Ekonomika zheleznyh dorog – The economy of railways*, 2024, no. 1, pp. 21-38. EDN HKWRQM. (In Russian).

7. Maksimova N.N., Sergamasova O.I. Queuing systems theory and its applications. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Estestvennye i ekonomicheskie nauki – Bulletin of Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, 2012, no. 59, pp. 17-25. EDN PZDDMV. (In Russian).

8. Chertkova T.V. [The role of priority service in optimizing transport process management]. *Problemy razvitiia transportnoi infrastruktury Evropeiskogo Severa Rossii : Materialy mezhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Kotlas, 20 marta 2003 g.* [Problems of development of transport infrastructure of the European North of Russia: Proceedings of the interregional scientific and practical conference, Kotlas, March 20, 2003]. Kotlas, 2003, no. 1, pp. 32-37. EDN VHKKDD. (In Russian).

9. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Lempert A.L. [On the application of queueing theory in modeling the operation of railway stations]. *Raspredeleнные komp'yuternye i telekommunikatsionnye seti: upravlenie, vychislenie, sviaz' (DCCN-2021) : materialy XXIV mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Moskva, 20 – 24 sentiabria 2021 g.* [Distributed Computer and Telecommunication networks: Management, Computing, communication (DCCN-2021) : proceedings of the XXIV International Scientific Conference, Moscow, September 20-24, 2021]. Moscow, 2021, pp. 263-268. DOI 10.25728/dccn.2021.038. EDN LCZEBX. (In Russian).

10. Panchenko Y.Y. On the issue of assessing the economic efficiency of railway transport integration into the digital economy. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 2021, no. 62, pp. 40-46. EDN BVSYGD. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калинин Кирилл Антонович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», заместитель начальника центра (научно-образовательный центр «Центр отраслевой экспертно-аналитической деятельности»), РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (926) 660-90-29.

E-mail: kalinin.k.a@mail.ru

Изюмников Денис Владимирович

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)).

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

Аспирант кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (926) 853-26-11.

E-mail: izyumnikovdenis@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Калинин, К. А. Повышение эффективности управления процессами перевозок в крупных агломерациях через приоритетное обслуживание входящего потока заявок / К. А. Калинин, Д. В. Изюмников. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 96 – 107.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kalinin Kirill Antonovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department of «Transport Business Management and Intelligent Systems», Deputy Chief of the Center (scientific and educational center «Center for Industry Expert and Analytical Activities»), RUT (MIIT).

Phone: +7 (926) 660-90-29.

E-mail: kalinin.k.a@mail.ru

Izyumnikov Denis Vladimirovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)).

9, Building 9, Obraztsova st., Moscow, 127055, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department of Transport Business Management and Intelligent Systems, RUT (MIIT).

Phone: +7 (926) 853-26-11.

E-mail: izyumnikovdenis@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kalinin K.A., Izyumnikov D.V. Increasing the efficiency of transportation process management in large agglomerations through priority servicing of incoming application flow. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 96-107. (In Russian).

УДК 656.225

А. П. Грeфенштейн, И. Н. Кагадий

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ «OPEN TOP» ДЛЯ ПЕРЕВОЗОК КАМЕННОГО УГЛЯ

Аннотация. Современные требования к организации перевозочного процесса зависят от технологического и инфраструктурного аспектов. Традиционные подходы в регулировании вагонопотоков, в том числе с использованием методов по минимизации порожних пробегов подвижного состава, приводят к потере выгодных для ОАО «РЖД» вариантов взаимодействия с клиентами в части организации экспорта и импорта с последующей реализацией данных грузов (товаров) на территории России.

Технология перевозок каменного угля в контейнерах типа «Open Top» с обратной загрузкой импортным грузом имеет преимущества, вытекающие из зарубежного и отечественного опыта реализации подобных перевозок. Настоящая статья содержит материал, основанный на экономических аспектах рассматриваемой технологии, в том числе отражает специфику и перспективы развития контейнерных перевозок угля.

Выполнен сравнительный анализ экономических показателей по нескольким вариантам транспортировки каменного угля. Для клиентов железнодорожного транспорта и ОАО «РЖД» обоснована целесообразность организации грузовых перевозок в контейнерах «Open Top» с формированием замкнутых маршрутов с обратной загрузкой импортным грузом в адрес промежуточной станции. Отмечено, что экономия замкнутого кольцевого маршрута каменного угля и безводного хлорида кальция в контейнерах достигает от 30 до 65 % по сравнению с использованием универсальных полувагонов.

Учитывая существующие условия загруженности железнодорожной инфраструктуры, использование контейнеров типа «Open Top» для перевозки разных грузов является ключевым преимуществом кольцевых маршрутов. Это важно учитывать при развитии экспортно-импортных отношений с дружественными странами.

Ключевые слова: каменный уголь, крупнотоннажный контейнер, Open Top, замкнутый маршрут, контейнерный поезд.

Anna P. Grefenshteyn, Igor N. Kagadiy

Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

ECONOMIC ASPECTS OF USING OPEN TOP CONTAINERS FOR COAL TRANSPORTATION

Abstract. Modern requirements for the organization of the transportation process depend on technological and infrastructural aspects. Traditional approaches to regulating car flows, including using methods to minimize empty runs of rolling stock, lead to the loss of profitable options for JSC Russian Railways to interact with customers in terms of organizing exports and imports with subsequent sale of these goods (products) in Russia.

The technology of transporting coal in «Open Top» containers with back loading with imported cargo has advantages arising from foreign and domestic experience in implementing such transportation. This article focuses on the economic aspects of the technology under consideration, including reflecting the specifics and prospects for the development of container transportation of coal.

A comparative analysis of economic indicators for several options for transporting coal is performed. For customers of railway transport and JSC Russian Railways, the feasibility of organizing freight transportation in «Open Top» containers with the formation of closed routes with back loading with imported cargo to an intermediate station is substantiated. It is noted that the savings of the closed ring route of coal and anhydrous calcium chloride in containers reach from 30% to 65% compared to the use of universal gondola cars. Given the current conditions of congestion of the railway infrastructure, the use of «Open Top» containers for the transportation of various goods is a key advantage of ring routes. This is important to consider when developing export-import relations with friendly countries.

Keywords: coal, large-capacity container, Open Top, closed route, container train.

Важный для российской промышленности железнодорожный транспорт преимущественно обслуживает массовые грузопотоки каменного угля, нефти и нефтепродуктов. Союз операторов железнодорожного транспорта (СОЖТ) отмечает общее увеличение экспорта угля на 0,5 %, на восток – на 4,6 %, в том числе через пограничные переходы на 75,2 % [1]. Основным поставщиком экспортного угля является Сибирский федеральный округ, а доля Кузбасса в этом объеме составляет 52,2 % [2].

По данным СОЖТ, ситуация с высокодоходными грузами иная, например, контейнерные грузы занимают менее 5 % в структуре погрузки ОАО «РЖД» [1]. Но объем контейнерных перевозок увеличился на 14,1 %. По данным АО «Морцентр – ТЭК», импортный и экспортный контейнерооборот в России вырос на 23 и 3,9 % соответственно, но транзитный сократился на 21 % [3]. Популярными грузами, перевозимыми в крупнотоннажных контейнерах, оказались станки, двигатели (+ 14,5 %), автомобили и их комплектующие (рост в 2,2 раза), строительные грузы (+ 26,8 %), химические и минеральные удобрения (рост в 2,2 раза), а также зерно (рост в 2,6 раза) [1].

Тенденции переориентации потоков массовых грузов и роста объемов перевозок в контейнерах диктует необходимость развития инфраструктуры железнодорожного транспорта и совершенствования перевозочного процесса [4]. Из открытых источников известны мероприятия по организации грузовых перевозок в условиях предельной загрузки мощностей Восточного полигона сети ОАО «РЖД», среди которых можно назвать следующие:

1) увеличение числа контейнерных поездов в восточном направлении с замещением отгрузок каменного угля, что позволит уменьшить дисбаланс между отправлением экспортных и прибытием импортных контейнеров;

2) увеличение тарифов на контейнерные перевозки в восточном направлении с одновременным снижением тарифов в порты Северо-Запада и Юга;

3) внедрение технологии сдвоенных длинносоставных (объединенных) контейнерных поездов, при которой можно будет доставлять из центральной и европейской частей страны порожние платформы для последующей погрузки контейнеров;

4) снижение тарифов на контейнерные перевозки из портов Дальнего Востока в полувагонах;

5) совершенствование нормативно-правовой базы, что позволит улучшить взаимодействие между перевозчиком и стивидорами, уменьшить время перевалки грузов в порту, сократить время обработки фитинговых платформ; внесение изменений в правила перевозок смерзающихся грузов, что даст возможность нарастить объемы вывоза в зимние месяцы;

6) рациональное оперирование вагонным парком, а именно сокращение порожних пробегов и концентрация грузовых вагонов с увеличенной нагрузкой на ось для эксплуатации только на восточном направлении;

7) использование порожних универсальных полувагонов при перевозке порожних и груженых контейнеров с Дальнего Востока [5] и др.

Зарубежный и отечественный опыт эксплуатации загруженных направлений и угольной маршрутизации позволяет отдельно выделить способ перевозки каменного угля в контейнерах открытого типа «Open Top».

В статье [6] рассмотрена технология перевозки каменного угля в контейнерах открытого типа «Open Top» и обоснована целесообразность организации такой доставки с формированием замкнутых маршрутов с обратной загрузкой импортным грузом в адрес промежуточной станции. Цель настоящей статьи – отражение экономических аспектов рассматриваемой технологии, а именно анализ структуры расходных составляющих сторон транспортного процесса.

Отметим, что ключевым преимуществом кольцевых маршрутов является возможность использования контейнеров для перевозки грузов широкой номенклатуры, что необходимо учитывать при современном развитии экспортно-импортных отношений в сегменте транспортного взаимоотношения с дружественными странами [7]. В условиях предельной загрузки мощностей Восточного полигона железных дорог применение контейнеров типа «Open Top», несомненно, является еще одним перспективным мероприятием по повышению провозной способности инфраструктуры.

В целях обеспечения сопоставимости результатов исследования приняты исходные данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные, принятые в расчетах провозных платежей [8]

Вид отправки	Маршрутная	Контейнерная
Тип вагона	Полувагон	Фитинговая платформа
Масса перевозимого груза в вагоне	69 т	68 т
Длина поезда	71 вагон	142 контейнера
Вид импортного груза	Кальций хлорид безводный	Оборудование для предприятий торговли общественного питания и фары автомобильные
Расчетная масса импортного груза	52 т	15 т
Программное обеспечение	«Rail-Тариф Россия»	

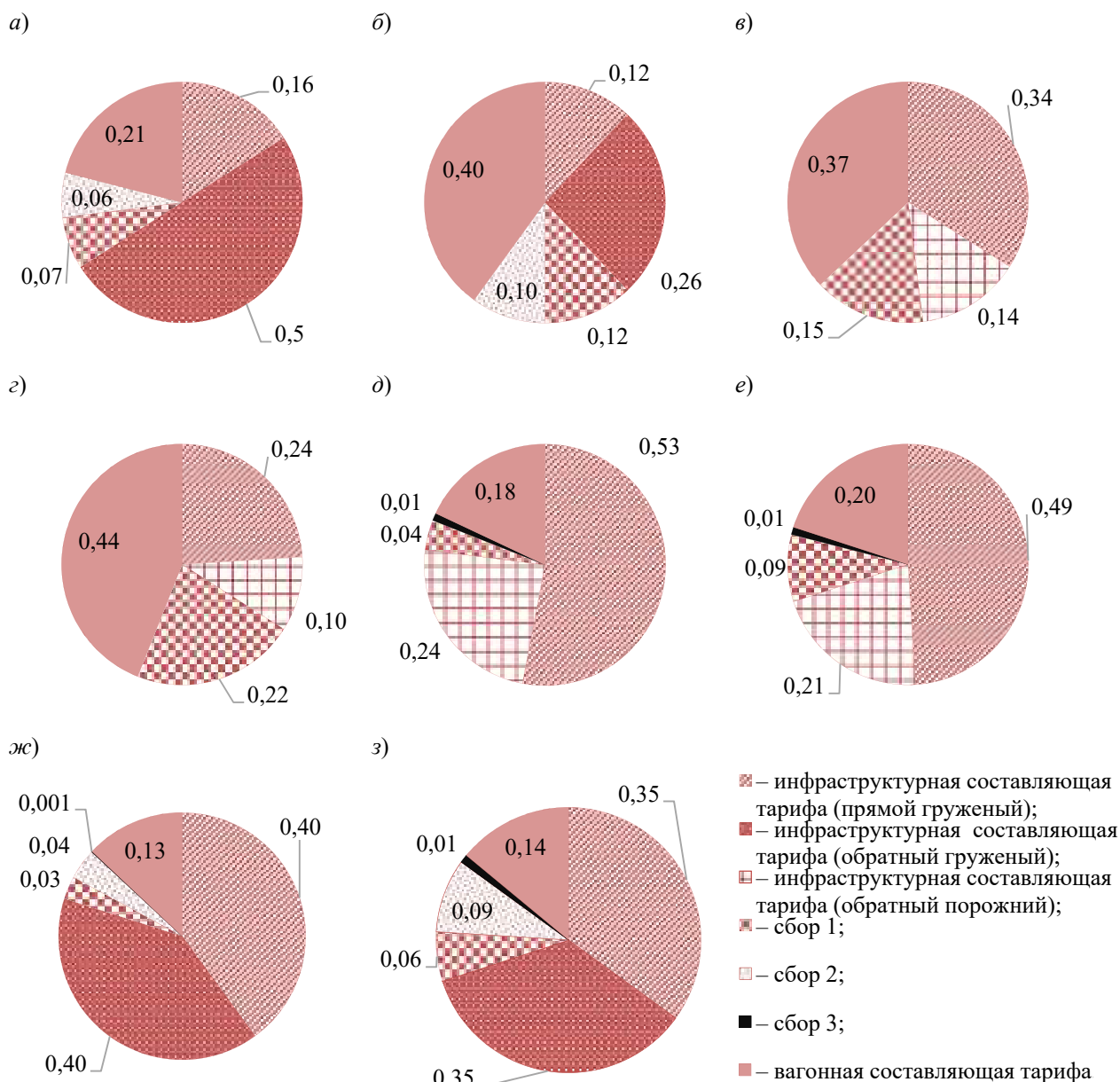
Отметим, что наиболее выгодными для ОАО «РЖД» вариантами транспортировки каменного угля являются перевозки по технологиям организации маршрутных и контейнерных поездов, так как у таких технологий показатели расхода за перевозку одной тонны груза наименьшие (таблица 2).

Таблица 2 – Укрупненный расчет провозной платы и расходов ОАО «РЖД» [8]

Направление перевозки	Вид отправки	Провозная плата за 1 т (с НДС), руб.	Расходы ОАО «РЖД» за перевозку 1 т, руб.
Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 (5901 км)	Маршрутная	2 559,46	1 706,31
	Контейнерная	2 959,73	1 868,52
Иркутская область – пограничный переход № 2 (1483 км)	Маршрутная	1 023,97	682,64
	Контейнерная	1 088,26	687,03
Забайкальский край – пограничный переход № 2 (285 км)	Маршрутная	348,28	232,19
	Контейнерная	367,87	232,24

Кроме этого для ОАО «РЖД» организация доставки грузов ускоренным контейнерным поездом экономически целесообразна, о чем свидетельствует сравнение коэффициентов рентабельности [9]: 1,25 – для перевозки в полувагонах, 1,32 – для перевозки в контейнерах.

Результаты оценки вариантов транспортировки каменного угля, в том числе с организацией обратной загрузки, для клиентов железнодорожного транспорта приведены на рисунке (структура расходов, %) и в таблице 3 (величина расходов, тыс. руб. и руб./т).



Структура расходов клиентов [8]:

- а) маршрутная отправка с обратным грузеным пробегом: Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс); б) маршрутная отправка с обратным грузеным пробегом: Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область; в) маршрутная отправка с обратным порожним пробегом (по договору): Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс); г) маршрутная отправка с обратным порожним пробегом (по договору): Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область; д) контейнерный поезд с обратным порожним пробегом: Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс); е) контейнерный поезд с обратным порожним пробегом: Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область; ж) контейнерный поезд с обратным грузеным пробегом: Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс); з) контейнерный поезд с обратным грузеным пробегом: Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область

Таблица 3 – Величины расходов клиентов [8]

Вид отправки	Возврат (предоставление) вагонов	Направление перевозки	Итого с НДС, тыс. руб.	Итого на 1 т, руб.
Маршрутная	Отсутствует (технический рейс)	Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1	31 447,41	6 419,15
		Иркутская область – пограничный переход № 2	20 627,77	4 210,61
		Пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс)	45 577,63	10 698,97
		Пограничный переход № 2 – Иркутская область	24 172,58	5 674,32
	Груженный (технический рейс)	Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс)	77 025,04	8 409,76
		Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область	44 800,36	4 891,40
	Порожний (по договору)	Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс)	36 594,42	7 469,77
		Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область	23 730,42	4 843,93
Контейнерная (контейнерный поезд)	Порожний (по договору)	Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс)	26 867,23	5 564,88
		Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область	10 777,58	2 232,31
	Груженный (по договору)	Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1 – Кемеровская область (Кузбасс)	36 005,62	3 961,89
		Иркутская область – пограничный переход № 2 – Иркутская область	15 132,49	1 665,11

При использовании клиентами контейнерных поездов инфраструктурная составляющая тарифа занимает значительную долю в структуре расходов:

1) на маятниковых маршрутах 49 – 53 % для прямого груженого пробега и 21 – 24 % для обратного порожнего, что соответствует общей доле 77 % (см. рисунок, д) и 70 % (см. рисунок, е);

2) на кольцевых маршрутах для прямого груженого пробега максимальное значение – 40 %, а для обратного груженого – 35 %, что соответствует общей доле 70 % (см. рисунок, з) и 80 % (см. рисунок, ж) соответственно.

Отметим, что при увеличении расстояния перевозки доля инфраструктурной составляющей также становится больше. В целом у контейнерных поездов по сравнению с маршрутными эта доля выше в 1,2 – 2 раза.

В структуре расходов дополнительный сбор за перевозки контейнеров по согласованному графику не превышает одного процента. Он обозначен как «сбор 3» (см. рисунок, д – з) и регламентируется Протоколом правления ОАО «РЖД» от 6 мая 2024 г. № 35, приложением № 1.

У маршрутных поездов дополнительный «сбор 1» за перегрузку каменного угля при отправке на экспорт из вагонов одной ширины колеи в вагоны другой ширины колеи составляет 7 – 22 %. У контейнерных поездов, напротив, ниже и доля равна 4 – 9 %. Отметим, что загруженные углем и импортным грузом контейнеры на пограничных переходах (станциях) переставляются с платформы на платформу при наличии обменного парка «Open Top», а не перегружаются.

Величина «сбора 2» за подобную перегрузку по прибытии импортных грузов на пограничные переходы и таможенное декларирование не различаются в рассмотренных вариантах.

Доля вагонной составляющей тарифа для контейнеров – 13 – 20 %, несмотря на то, что необходимо арендовать два типа оборудования – контейнеры и платформы; при использовании вагонов – 21 – 44 %.

Анализ результатов расчетов в денежном выражении (см. таблицу 3) показывает, что расходы клиентов на экспортные и экспортно-импортные перевозки в контейнерных поездах меньше по сравнению с традиционной маршрутной отправкой в полувагонах [6].

В обобщенном виде расходы клиентов в среднем окажутся меньше в 1,3 – 2,9 раза в зависимости от конкретного варианта. Например, на направлении «Кузбасс – пограничный переход № 1 – Кузбасс» перевозка в ускоренных контейнерных поездах с обратным груженым пробегом дешевле в 2,1 раза, а если обратный пробег окажется порожним, то уже всего лишь в 1,3 раза. Это еще раз подтверждает актуальность и перспективы организации замкнутого кольцевого маршрута между тремя станциями, когда на территории России находятся два клиента такой схемы перевозки: первый – углепогрузочная станция, второй – получатель импортного груза из дружественной страны. Два выгодоприобретателя делят расходы пропорционально степени участия в новой технологии. Например, часть перевозки «пограничный переход – промежуточная станция» оплачивается вторым клиентом. Первый – несет расходы за перевозку «станция отправления – пограничный переход» и «подвоз с промежуточной станции – станция отправления».

Такая схема организации перевозочного процесса выгодна для клиента-экспортера каменного угля, так как по сравнению с возвратом порожних контейнеров с пограничной станции уменьшаются плечо доставки и стоимость перевозки порожних контейнеров, а также для ОАО «РЖД», так как повышается провозная способность путей сообщения за счет снижения порожнего пробега подвижного состава.

Чтобы подробнее продемонстрировать пропорции разделения расходов между выгодоприобретателями, в таблице 4 приведены расходы клиентов на закольцованном маршруте между тремя станциями с обратной загрузкой импортным грузом в адрес промежуточной станции.

Таблица 4 – Расходы клиентов на маршруте между тремя станциями с обратной загрузкой импортным грузом в адрес промежуточной станции [8]

Элементы маршрута с обратной загрузкой	Особенности загрузки вагонов	Расходы клиентов с НДС, тыс. руб.
Кемеровская область (Кузбасс) – пограничный переход № 1	Каменный уголь	17 804,89
Пограничный переход № 1 – промежуточная станция , Кемеровская область (Кузбасс)	Оборудование для предприятий торговли общественного питания	12 686,17
Промежуточная станция , Кемеровская область (Кузбасс) – Кемеровская область (Кузбасс)	Порожний	1 997,69
Итого (экспортер каменного угля), уголь + порожний		19 802,58
Итого		32 488,74
Иркутская область – пограничный переход № 2	Каменный уголь	7 368,33
Пограничный переход № 2 – промежуточная станция , Республика Бурятия	Автомобильные фары	4 426,90
Промежуточная станция , Республика Бурятия – Иркутская область	Порожний	1 750,44
Итого (экспортер каменного угля), уголь + порожний		9 118,77
Итого		13 545,67

Общие расходы (в абсолютном выражении в руб.) при использовании контейнерного поезда с обратным порожним пробегом, казалось бы, меньше на 27 – 33 %, чем у обратного груженого пробега. Однако в пересчете к удельным расходам (руб./т) обратная загрузка

контейнеров импортным грузом позволит сэкономить 25 – 28 % за перевозку каждой тонны в прямом и обратном направлениях. Полученные результаты (сравнение данных таблиц 3 и 4) показывают, что расходы клиента-экспортера угля на первом направлении сократятся в 1,36 раза (с 26 867,23 тыс. руб. до 19 802,58 тыс. руб.) и на втором – в 1,18 раза (с 10 777,58 тыс. руб. до 9 118,77 тыс. руб.).

Выполненное экономическое сравнение расходов участников перевозок каменного угля в контейнерах типа «Open Top» при формировании замкнутых маршрутов позволяет сделать вывод о целесообразности и логистическом потенциале такой формы организации перевозочного процесса, особенно в условиях развития экспортно-импортного сообщения с дружественными странами.

Список литературы

1. Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2023 г. // [railsovet.ru](https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8lsvwuojq6qh1rd.pdf) : сайт. – Текст : электронный. – URL: [https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8lsvwuojq6qh1rd.pdf/](https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8lsvwuojq6qh1rd.pdf) (дата обращения: 10.02.2025).

2. Мешков, Г. Б. Итоги работы угольной промышленности за 2023 год / Г. Б. Мешков, И. Е. Петренко, Д. А. Губанов. – Текст : непосредственный // Уголь. – 2024. – № 3 (1178). – С. 18–29. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29. – EDN SXIWPК.

3. Перспективы развития рынка контейнерных перевозок в 2024 году. В поисках баланса. Как развиваются контейнерные перевозки в России и мире // sber.pro : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://sber.pro/publication/v-poiskah-balansa-kak-razvivayutsya-konteiner-nie-perevozki-v-rossii-i-mire/> (дата обращения: 10.02.2025);

4. Чигрин, Н. С. Характеристика проблем перевозок грузов железнодорожным транспортом в восточном направлении / Н. С. Чигрин, Е. С. Борисенков, А. П. Грефенштейн. – Текст : электронный // Техника и технология транспорта. – 2023. – № 4 (31). – EDN ZКСJKE.

5. Корнеев, М. В. Анализ существующих и предлагаемых способов размещения и крепления крупнотоннажных контейнеров в универсальных железнодорожных полувагонах / М. В. Корнеев, П. С. Бурдяк. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (69). – С. 71–79. – DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71. – EDN AZZEBN.

6. Кагадий, И. Н. Перспективы контейнерных перевозок угля / И. Н. Кагадий, А. П. Грефенштейн. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2024. – № 12. – С. 18–21. – EDN KRYPBS.

7. Петренева, Е. А. Контрейлерные перевозки как метод логистического подхода / Е. А. Петренева. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 105–115. – EDN DCIKTX.

8. Прейскурант № 10-01: Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами : [утвержден постановлением Федеральной энергетической комиссии РФ № 47-т/5 от 17.06.2003]. – Москва, 2003. – Ч.1. – 151 с.; Ч.2. – 451 с. – Текст : непосредственный.

9. Климова, Е. В. Методика установления эффективности перевозки массовых грузов в различных типах подвижного состава / Е. В. Климова, А. М. Фролова. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 3. – С. 9–19. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-03-2. – EDN BEFBLS.

References

1. *Obzor raboty gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta za 12 mesiatsev 2023 goda* [Overview of freight rail transport operations for the 12 months of 2023]. Available at: <https://railsovet.ru/upload/iblock/d0c/9b2tx6i2zwc4u7x8lsvwuojq6qh1rd.pdf> (accessed 10.02.2025). (In Russian).

2. Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Russia's coal industry performance for January – December, 2023. *Ugol' – Russian Coal Journal*, 2024, no. 3(1178), pp. 18-29. DOI 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29. EDN SXIWPK. (In Russian).

3. *V poiskakh balansa. Kak razvivaiutsia konteinerne perevozki v Rossii i mire* [In search of balance. How container transportation is developing in Russia and the world]. Available at: <https://sber.pro/publication/v-poiskakh-balansa-kak-razvivayutsya-konteinerne-perevozki-v-rossii-i-mire/> (accessed 10.02.2025). (In Russian).

4. Chigrin N.S., Borisenkov E.S., Grefenstein A.P. Characteristics of the problems of cargo transportation by rail on Eastern direction. *Tekhnika i tekhnologiya transporta – Technique and technology of transport*, 2023, no. 4(31). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_55170615_84546029.pdf (accessed 10.02.2025). EDN ZKCJKE. (In Russian).

5. Korneev M.V., Burdyak P.S. Analysis of existing and proposed methods of arrangement and fastening of large-tonnage containers in universal railway gondola cars. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia – The Siberian Transport University Bulletin*, 2024, no. 2(69), pp. 71-79. DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_71. EDN AZZEBN. (In Russian).

6. Kagadiy I.N., Grefenshteyn A.P. Prospects of coal container transportation. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2024, no. 12, pp. 18-21. EDN KRYPBS. (In Russian).

7. 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). EDN DCIKTX.

8. Price List No. 10-01: Tariffs for cargo transportation and infrastructure services performed by Russian railways. Moscow, 2003. P.I, 151 p., P.II, 451 p. (In Russian).

9. Klimova E.V., Frolova A.M. Methodology for determining the efficiency of bulk cargo transportation in various types of rolling stock. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik – Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2024, no. 3, pp. 9-19. DOI 10.36535/0236-1914-2024-03-2. EDN BEFBLS. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Грефенштейн Анна Павловна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-58.

E-mail: anna_020295@mail.ru

Кагадий Игорь Николаевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-58.

E-mail: kagaigor@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Грефенштейн, А. П. Экономические аспекты использования контейнеров «Open Top» для перевозок каменного угля / А. П. Грефенштейн, И. Н. Кагадий. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 107 – 114.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grefenshteyn Anna Pavlovna

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Logistics, commercial work and rolling stock», STU.

Phone: +7 (383) 328-04-58.

E-mail: anna_020295@mail.ru

Kagadiy Igor Nikolaevich

Siberian Transport University (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «Logistics, commercial work and rolling stock», STU.

Phone: +7 (383) 328-04-58.

E-mail: kagaigor@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Grefenshteyn A.P., Kagadiy I.N. Economic aspects of using «Open Top» containers for coal transportation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 107-114. (In Russian).

С. Б. Джахьяева, Е. В. Климова, Н. В. Дульгер

Астраханский государственный технический университет (АГТУ), г. Астрахань, Российская Федерация

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СЕВЕРНОГО ОБХОДА МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР – ЮГ»

Аннотация: В статье освещена значимость международного транспортного коридора «Север – Юг» для нашей страны. Важно учитывать, что Астраханский регион является воротами, открывающими выход на международное транспортное сообщение. Через город Астрахань и Астраханскую область проходят как водный, так и автомобильные пути, являющиеся частью международного транспортного коридора «Север – Юг». Автомобильные пути сообщения являются крайне востребованными ввиду мультимодальности грузоперевозок, а также снижения объемов при использовании водных путей по причине обмеления Волго-Каспийского канала. Существующие автомобильные пути сообщения проходят через городскую среду, заметно повышая транспортную нагрузку. Это приводит к ухудшению состояния дорожного покрытия, негативно влияет на экономическую и экологическую составляющие, наблюдается рост числа заторовых состояний. Для повышения эффективности функционирования международного транспортного коридора «Север – Юг» разработаны планировочные решения. Задача планирования заключалась в перенаправлении транзитных транспортных потоков с целью отвода их из города, не сокращая протяженности автомобильных путей сообщения. Реализация планировочных решений выполнена посредством программного продукта PTV Vision® VISSIM. В статье представлена разработанная схема альтернативного маршрута, реализуемая посредством строительства Северного обхода, включающего в себя строительство нового мостового сооружения через реку Волга и автомобильных развязок. Данное планировочное решение позволит сократить в два раза протяженность автомобильных путей сообщения, являющихся региональной частью международного транспортного коридора «Север – Юг». В случае реализации предлагаемый проект позволит разгрузить магистрали города Астрахань, повысить пропускную способность и безопасность движения.

Ключевые слова: транспортный коридор, «Север – Юг», моделирование, транспортные потоки, транзитный транспорт, проектирование, автомобильные дороги, автомобильный транспорт.

Svetlana B. Dzhakhyaeva, Ekaterina V. Klimova, Nadezda V. Dulger

Astrakhan State Technical University (ASTU), Astrakhan, the Russian Federation

FORMATION OF THE TRANSPORT SYSTEM OF THE ASTRAKHAN REGION DURING THE CONSTRUCTION OF THE NORTHERN BYPASS OF THE INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDOR “NORTH – SOUTH”

Abstract. The article highlights the importance of the international transport corridor “North – South” for our country. It is important to consider that the Astrakhan region is a gateway to international transport links. Both water and road routes, which are part of the North-South ITC, pass through the city of Astrakhan and the Astrakhan region. Road communication routes are extremely in demand due to the multimodality of cargo transportation, as well as the decrease in volumes when using waterways due to the shallowing of the Volga-Caspian Canal. Existing road transport routes pass through the urban environment, significantly increasing the traffic load. This leads to a deterioration in the condition of the road surface, negatively affects the economic and environmental components, and there is an increase in the number of congestion conditions. To improve the efficiency of the North-South international transport corridor, planning solutions have been developed. The planning task was to redirect transit traffic flows in order to divert them from the city, reducing the length of road communications. The implementation of planning solutions was carried out using the PTV Vision® VISSIM software product. The article presents the developed scheme of an alternative route, implemented through the construction of the Northern Bypass, which includes the construction of a new bridge across the Volga River, as well as road interchanges. This planning solution will allow the length of road communications, which are a regional part of the international transport corridor “North-South,” to be halved. If implemented, the proposed project will relieve congestion on the highways of the city of Astrakhan, increase traffic capacity and traffic safety.

Keywords: transport corridor, “North – South”, modeling, traffic flows, transit transport, design, highways, road transport.

Географическое положение Астраханского региона обуславливает стратегическую важность транспортного узла в логистических связях, реализуя ключевую позицию на самых коротких, экономически выгодных евро-азиатских транспортных маршрутах [1 – 4].

Для повышения эффективности международного транспортного коридора «Север – Юг» в Астрахани планируется строительство третьего моста через Волгу. Этот мост будет являться продолжением Северного обхода. Строительство с бюджетом 33,2 млрд руб. планируют начать в 2025 г. и завершить в 2029 г. [1, 5]. Реализация проекта подразумевает строительство двух многоуровневых транспортных развязок и объекта мостового перехода на территории п. Стрелецкое через реку Волга. Предположительно протяженность объекта будет длиной 12,5 км.

В настоящее время часть МТК «Север – Юг» проходит через город Астрахань. Грузовой транзитный автотранспорт передвигается по магистралям крупного населенного пункта, вынужден преодолевать наиболее загруженный мост, соединяющий левый и правый берега реки Волги. За последние годы наблюдается рост интенсивности транзитных потоков через регион. Кроме того, отмечается рост туристического потока. Ежегодно, в период с марта по ноябрь в область направляются на личном автотранспорте любители активного отдыха из разных регионов нашей страны. Центрами притяжения для них являются рекреационные территории в границах водно-болотных угодий Астраханской области. Как следствие, возникающая дополнительная нагрузка на дорожную сеть региона негативно отражается на уровне безопасности. Так, согласно статистике ГИБДД [6] за пятилетний период наблюдается рост дорожно-транспортных происшествий с участием грузового транспорта, практически «стоит» на месте и количество аварий в области на фоне снижения показателя на территории города (рисунок 1).



Рисунок 1 – Статистические данные аварийности в период с 2019 по 2023 г.

Отвод транзитного транспорта, который в основной своей массе представлен коммерческим грузовым составом, а также перенаправление потока легкового транспорта непосредственно к территориям назначения в области в обход областного центра помогут значительно разгрузить городскую транспортную сеть. Как следствие, ожидается снижение негативного влияния грузового транспорта на дорожное полотно и уменьшение количества задержек и заторов.

Согласно данным ФКУ Упрдор «Каспий» [7] строительство Северного обхода позволит повысить эффективность функционирования отрезка МТК, пролегающего через регион, и создаст условия для развития Астраханского транспортного узла в целом.

В рамках развития МТК в регионе уже построена транспортная развязка, соединяющая крупный микрорайон Бабаевского, Аксарайское шоссе, на котором расположен Астраханский

газоперерабатывающий завод, крупные села с центральной частью города. В настоящее время существующая схема движения Северный обход – Стрелецкое имеет вид, представленный на рисунке 2.

При движении по Северному обходу в сторону города от пересечения с Аксарайским шоссе располагается поворот под углом 90° . Отсюда планируется строительство развязки, примыкающей к будущему мосту, которая будет связывать Северный обход с селом Стрелецкое (рисунок 3).



Рисунок 2 – Существующая схема движения Северный обход – Стрелецкое



Рисунок 3 – Участок Северного обхода (вид со спутника)

Северный обход протянется над рекой Волгой и примкнет к федеральной трассе Р-22 «Каспий», находящейся в ведении федерального казенного учреждения «Управление

автомобильной магистрали Москва – Волгоград Федерального дорожного агентства», на 1372-м километре.

Рассматриваемый участок дороги имеет основные пересечения: автомобильная дорога Северного обхода – Аксарайское шоссе; улица Латышева – улица Савушкина; улица Савушкина – улица Анри Барбюса; улица Магистральная – Николаевское шоссе; автомобильная дорога Р-22 «Каспий» (1373-й километр) – улица Автострадная.

Пересечение автомобильной дороги Северного обхода и Аксарайского шоссе происходит в разных уровнях и представлено в виде транспортной развязки типа «Труба» (рисунок 4).

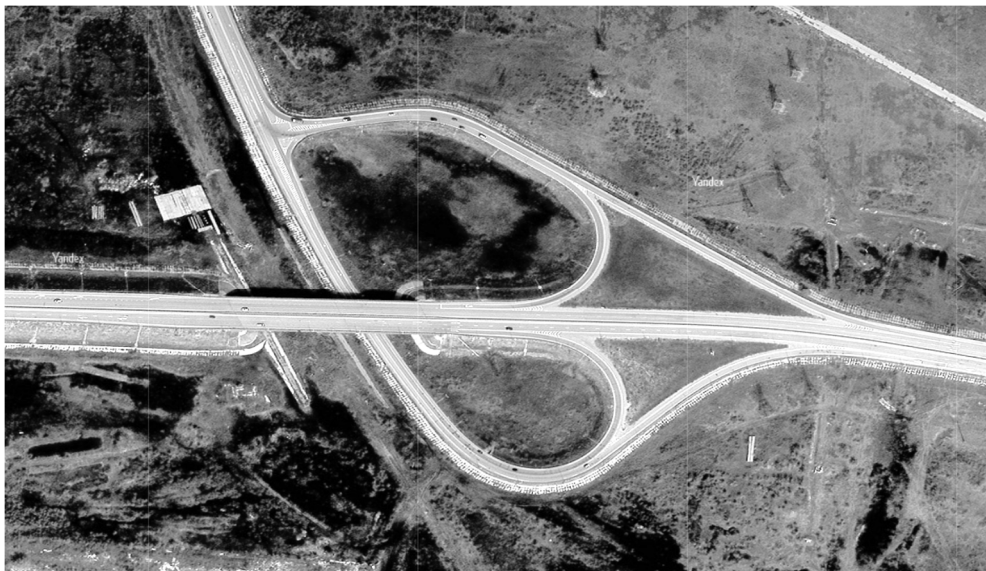


Рисунок 4 – Пересечение Аксарайского шоссе и Северного обхода (вид со спутника)

Согласно СП 42.13330–2016 [8] рассматриваемый участок Северного обхода относится к дороге I А/Б категории, дорога имеет асфальтобетонное покрытие, четыре полосы движения (по две полосы в каждом направлении). Встречные потоки разделены конструктивной разделительной полосой, ширина полосы движения составляет 3,75 м, обустроено искусственное освещение.

Аксарайское шоссе согласно СП 42.13330–2016 [8] относится к дороге II категории. Дорога имеет асфальтобетонное покрытие, две полосы движения (по одной полосе в каждом направлении). Ширина полосы движения составляет 3,75 м, ширина обочина – 2 м. На подъезде к развязке располагается пункт контроля весогабаритных параметров.

В результате натурного исследования было принято решение о модернизации существующей схемы организации движения на двух участках. Демонстрация разработанного проекта выполнена при использовании программного пакета моделирования транспортных потоков на макроуровне PTV Vision® VISSIM [9], который позволил решить вопросы транспортного планирования на всех этапах, а также смоделировать на проектируемом участке транспортную развязку. Выстроенные автомобильные пути сообщения, наложенные на топографическую карту мест предполагаемого строительства дорог, позволяют оценить предлагаемое проектное решение с точки зрения удобства и доступности посредством визуального анализа. В этом заключается основная роль использования программного продукта.

Для создания транспортного предложения индивидуального транспорта, которое состоит из перекрестков (узлов) и участков дорог между перекрестками (перегонов), использовались данные геоинформационных систем (ГИС) [10, 11]. Для задания параметров улично-дорожной сети как на перегонах, так и на перекрестках применен ручной способ ввода данных.

Так, как модернизация подразумевает строительство транспортной развязки, а соответственно и изменение в организации движения, в ходе разработки проекта по направлению

г. Астрахань – Аксарайское шоссе, автодорога Р-22 «Каспий» – Северный обход было проработано введение дополнительных дорожных знаков. Пример предлагаемых решений в части организации дорожного движения представлен на рисунке 5.



a



б

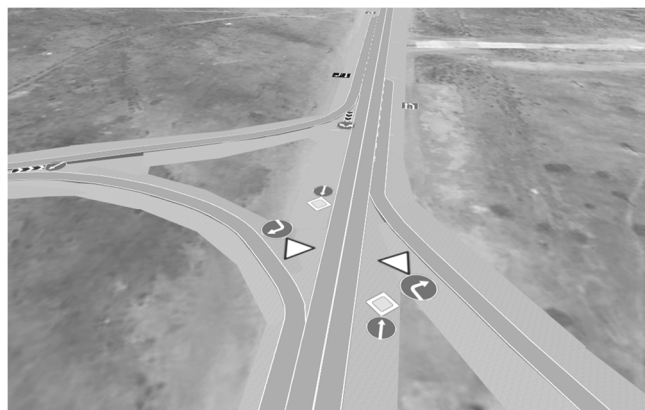


в

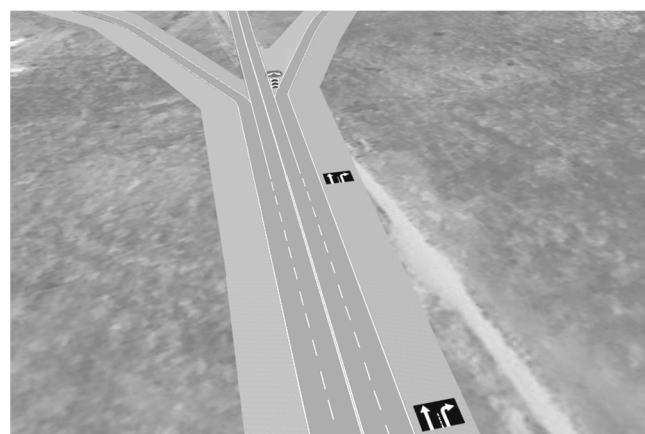
Рисунок 5 – Примеры предлагаемых решений в части организации дорожного движения: предлагаемая схема участка автомобильной дороги Астрахань – Аксарайское шоссе (*a*), предлагаемая схема участка Северный обход – автодорога Р-22 «Каспий» (*б*), предлагаемая схема участка автомобильной дороги Р-22 – г. Астрахань (*в*)

На участке автомобильной дороги Р-22 «Каспий» на 1372-м километре спроектирована транспортная развязка типа «Труба». Для обеспечения всех задач организации дорожного движения необходима установка дорожных знаков [12].

В рамках модернизации транспортной сети в направлении ул. Мелиоративная – г. Нариманов на подъезде к транспортной развязке и на спроектированном направлении Северный обход – Р-22 «Каспий» согласно требованиям ГОСТов [13, 14] предполагается установка технических средств организации дорожного движения. Общий вид предлагаемой транспортной развязки представлен на рисунках 6 и 7.



a



б

Рисунок 6 – Предлагаемые схемы организации дорожного движения в границах Северного обхода: предлагаемая схема направления ул. Мелиоративная – г. Нариманов (*a*) и предлагаемая схема направления Северный обход – Р-22 «Каспий» (*б*)



Рисунок 7 – Схема общего вида предлагаемой развязки

Отвод проходного транспорта позволит разгрузить одну из востребованных магистралей города, в непосредственной близости к которой размещены три университета, общежитие, три школы, два детских сада, парк отдыха, торговый центр, магазины, детская поликлиника, Центральный стадион, два строящихся жилых квартала и уже имеющиеся многоэтажные жилые дома, – улицу Савушкина Ленинского района г. Астрахани. Практическая пропускная способность на указанной магистрали согласно расчетам по методике ОДМ 218.2.020–2012 [15] и результатам натурных измерений увеличится в 1,7 раза относительно имеющейся в настоящее время ввиду изменения состава движения и его суточной интенсивности.

Согласно разработанному проекту, трассировка Северного обхода составит 12,60 км, длина мостового сооружения – 18,47 км. Ввод в эксплуатацию спроектированного объекта Северный обход МТК «Север – Юг» позволит увести грузовой транзитный транспорт в обход центральной части города, что обеспечит сохранность автомобильных путей сообщения, увеличить пропускную способность, создаст условия для бесперебойного функционирования логистического аппарата. Предлагаемое решение сделает возможным сокращение в два раза расстояния при пересечении автомобильным транспортом реки Волги, что даст позитивный эффект в части экономических и экологических показателей.

Альтернативный маршрут, соединяющий посредством автомобильной дороги порты «Астрахань» (г. Астрахань), «Оля» (Астраханская область) и «Махачкала» (г. Махачкала, Республика Дагестан) и пункт пропуска грузов «Караузек» (Республика Казахстан), позволит повысить скорость транспортировки транзитных грузов международного коридора. Автомобильный путь является достойной альтернативой водному ввиду обмеления Волго-Каспийского канала, открывающего ворота в Каспийское море. Предлагаемое спланированное и смоделированное решение по строительству Северного обхода позволит повысить эффективность работы МТК «Север – Юг», обеспечив и транспортную безопасность страны.

Список литературы

1. Бабушкин, И. Ю. Астраханская область – ключевой регион МТК «Север – Юг» / И. Ю. Бабушкин. – Текст : непосредственный // Морские порты. – 2023. – № 2 (213). – С. 43–46.
2. Волынский, И. А. Роль Астраханской области как ключевого транспортно-логистического узла в международном транспортном коридоре «Север – Юг» – Текст : электронный // Каспийский регион: политика, экономика, культура. – 2019. – № 3 (60). – С. 207 – 212. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-astrahanskoy-oblasti-kak-klyuchevogo-transportno-logisticheskogo-uzla-v-mezhdunarodnom-transportnom-koridore-sever-yug> (дата обращения: 06.02.2025).
3. Выдашенко, Л. А. Новые тенденции и перспективы развития международного транспортного коридора «Север – Юг» / Л. А. Выдашенко, П. А. Выдашенко. – Текст : непосредственный // Бюллетень науки и практики. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 239–246. – DOI 10.33619/2414-2948/87/28. – EDN COQOVK.
4. Малышева, Д. Б. Международный транспортный коридор «Север – Юг» в стратегии России / Д. Б. Малышева. – Текст : непосредственный // Россия и новые государства Евразии. – 2021. – № 2 (51). – С. 59–72. – DOI 10.20542/2073-4786-2021-2-59-72. – EDN ZIXORC.
5. Государство, право, общество в условиях глобализирующегося мира / А. В. Захаров, О. В. Белянская, А. П. Бибаров-Государев [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Перспектив», 2024. – 336 с. – Текст : непосредственный. – EDN PFPSGI.
6. Показатели состояния безопасности дорожного движения // stat.gibdd.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 10.10.2024).
7. ФКУ Упрдор «Каспий» // kasp.rosavtdor.gov.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.kasp.rosavtdor.gov.ru/> (дата обращения: 08.10.2024).
8. СП 42.13330–2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 101 с. – Текст : непосредственный.
9. PTV PARTNER // ptv-vision.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.ptv-vision.ru/> (дата обращения: 08.08.2024).

10. Уткин, А. В. Распределение транспортных средств по полосам движения на участках переплетения / А. В. Уткин, Н. Дао Зунг. – Текст : непосредственный // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2010. – № 1 (52). – С. 4–6. – EDN KZZZBX.
11. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. – Москва : Логос, 2013. – 188 с. – Текст : непосредственный. – EDN RXRQZV.
12. Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения. – Москва : Стандартинформ, 2022. – 43 с. – Текст : непосредственный.
13. ГОСТ Р 52290–2004. Технические средства организации дорожного движения. Знаки дорожные. Общие технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2004. – 173 с. – Текст : непосредственный.
14. ГОСТ Р 52289–2019. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 134 с. – Текст : непосредственный.
15. ОДМ 218.2.020–2012. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – Москва : Информавтодор, 2012. – 148 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Babushkin I.Yu. Astrakhan region is key-area of international transport corridor “North – South”. [Astrahanskaya oblast' – klyuchevoj region MTK «Sever – Yug» – *Morskie porty*] – *Seaports*, 2023, no. 2 (213), pp. 43–46. (In Russian).
2. Volunsky I.A. Role of the Astrakhan region as a key transportation and logistics unit in the international “North – South” transport corridor. [Rol' Astrahanskoj oblasti kak klyuchevogo transportno-logisticheskogo uzla v mezhdunarodnom transportnom koridore «Sever – Yug». – *Kaspijskij region: politika, ekonomika, kul'tura*] [Caspian region: politics, economics, culture]. Astrakhan, 2019, pp. 207–212. (In Russian).
3. Vydashenko L., Vydashenko P. New trends and prospects for the development of the North-South international transport corridor. [Novye tendencii i perspektivy razvitiya mezhdunarodnogo transportnogo koridora «Sever – Yug» – *Biulleten' nauki i praktiki*] – *Bulletin of Science and Practice*, 2023, vol. 9, no. 2, pp. 239–246. DOI 10.33619/2414-2948/87/28. EDN COQOBK. (In Russian).
4. Malysheva D.A. The North – South International Transport Corridor in strategy of Russian Federation. [Mezhdunarodnyj transportnyj koridor «Sever – Yug» v strategii Rossii – *Rossia i novye gosudarstva Evrazii*] – *Russia and the New Eurasian States*, 2021, no. 2 (51), pp. 59–72. DOI 10.20542/2073-4786-2021-2-59-72. EDN ZIXORC. (In Russian).
5. Zakharov A.V., Belyanskaya O.V., Bibarov-Gosudarev A.P. et al. *Gosudarstvo, pravo, obschestvo v usloviyah globaliziruiycshegocya mira* [State, Law and Society in the conditions of word globalization]. Moscow, Prospect Publ., 2024, 336 p. EDN PFPSGI. (In Russian).
6. *Pokazateli sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Road safety indicators]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (accessed 10.10.2024).
7. *FKU Uprdor “Kaspy”* [FGI Uprdor “Kaspy”]. Available at: <http://www.kasp.rosavtodor.gov.ru/> (accessed 08.10.2024).
8. SP 42.13330.2016 Urban planning. Planning and building of urban and rural settlements. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 101 p. (In Russian).
9. PTV PARTNER. Available at: <http://www.ptv-vision.ru> (accessed 08.08.2024).
10. Utkin A., Dao Zung N. Distribution of vehicles by lanes on weaving sections. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli – Science and technology in the road industry*, 2010, no. 1 (52), pp. 4–6. EDN KZZZBX. (In Russian).

11. Yakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnyh modeley gorodov* [Transport planning: creating transport models of the cities]. Moscow, Logos Publ., 2013, 188 p. EDN RXRQZV. (In Russian).

12. Methodological recommendations for conducting traffic monitoring. Moscow, Standartinform Publ., 2022. 43 p. (In Russian).

13. National Standard 52290–2004. Technical means of organizing traffic. Technical means of organizing traffic. Road signs. General technical requirements. Moscow, Standardinform Publ., 2004. 173 p. (In Russian).

14. National Standard 52289–2019. Technical means of organizing traffic. Rules for the use of road signs, markings, traffic lights, road barriers and guide devices. Moscow, Standardinform Publ., 2020. 134 p. (In Russian).

15. ODM 218.2.020–2012. Industry road methodological document. Methodological recommendations for assessing the capacity of highways. Moscow, Informavtodor Publ., 2012. 148 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Джахьяева Светлана Борисовна

Астраханский государственный технический университет» (АГТУ).

Татищева ул., д. 16, г. Астрахань, 414025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт», АГТУ.

Тел.: +7 (908) 612-01-49.

E-mail: psb1976@yandex.ru

Климова Екатерина Владимировна

Астраханский государственный технический университет (АГТУ).

Татищева ул., д. 16, г. Астрахань, 414025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт», АГТУ.

Тел.: +7 (909) 375-59-43.

E-mail: katuwaastu@yandex.ru

Дульгер Надежда Валерьевна

Астраханский государственный технический университет (АГТУ).

Татищева ул., д. 16, г. Астрахань, 414025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт», АГТУ.

Тел.: +7 (927) 280-48-78.

E-mail: nduiger@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Джахьяева, С. Б. Формирование транспортной системы Астраханской области при строительстве Северного обхода международного транспортного коридора «Север – Юг» / С. Б. Джахьяева, Е. В. Климова, Н. В. Дульгер. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 115 – 123.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dzhakhyaeva Svetlana Borisovna

Astrakhan State Technical University (ASTU).

16, Tatistcheva st., Astrakhan, 414025, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «General engineering disciplines and ground transport», ASTU.

Phone: +7 (908) 612-01-49.

E-mail: psb1976@yandex.ru

Klimova Ekaterina Vladimirovna

Astrakhan State Technical University (ASTU).

16, Tatistcheva st., Astrakhan, 414025, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «General engineering disciplines and ground transport», ASTU.

Phone: +7 (909) 375-59-43.

E-mail: katuwaastu@yandex.ru

Dulger Nadezda Valerevna

Astrakhan State Technical University (ASTU).

16, Tatistcheva st., Astrakhan, 414025, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, associate professor of the department «General engineering disciplines and ground transport», ASTU.

Phone: +7 (927) 280-48-78.

E-mail: nduiger@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Dzhakhyaeva S.B., Klimova E.V., Dulger N.V. Formation of the transport system of the Astrakhan region during the construction of the Northern bypass of the international transport corridor “North – South”. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 115-123. (In Russian).

З. Г. Мухамедова, С. Х. Ахмедов, Г. М. Юлдашова

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

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УЗБЕКИСТАНА И ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПОЕЗДОВ

***Аннотация.** В данной статье рассматривается развитие транспортно-логистической системы Узбекистана с акцентом на оптимизацию графика движения контейнерных поездов. Благодаря своему стратегическому географическому положению Узбекистан является важным транзитным узлом, соединяющим Европу и Азию. Непрерывный рост грузопотоков и возрастающая потребность в повышении логистической эффективности требуют комплексного подхода к модернизации железнодорожной инфраструктуры и оптимизации транспортных процессов. В ходе исследования проведен детальный анализ текущего состояния железнодорожной сети Узбекистана, выявлены ключевые направления ее развития. Особое внимание уделено внедрению контейнерных перевозок, которые обладают значительными преимуществами, такими как снижение транспортных затрат, повышение надежности доставки грузов и минимизация воздействия на окружающую среду. Для оценки эффективности транспортных решений применены математические модели, позволяющие анализировать пропускную способность станций и составлять расписания движения поездов. Сравнительный анализ различных методов грузоперевозок выполнен с использованием критериев принятия решений Лапласа и Вальда, что позволило определить оптимальный вид транспортировки и ее маршрут. Результаты исследования показывают, что хорошо спланированный график движения способствует увеличению объемов перевозок, улучшению логистической координации и укреплению позиций Узбекистана как ключевого транзитного коридора. Кроме того, в исследовании подчеркиваются экономические и операционные выгоды внедрения оптимизированных графиков контейнерных поездов. Выводы данного исследования способствуют разработке стратегий модернизации железнодорожной инфраструктуры и содержат практические рекомендации по повышению эффективности грузовых перевозок. Полученные результаты могут быть полезны государственным органам и представителям отрасли для принятия обоснованных решений, направленных на повышение конкурентоспособности транспортных коридоров Узбекистана в глобальной логистической сети.*

***Ключевые слова:** Узбекистан, транспортно-логистическая система, контейнерные поезда, оптимизация, развитие инфраструктуры.*

Ziyoda G. Mukhamedova, Sardorbek X. Akhmedov, Guzal M.Yuldashova

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

DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM OF UZBEKISTAN AND THE TIMETABLE FOR THE MOVEMENT OF PIGGYBACK TRAINS

***Abstract.** This article examines the development of Uzbekistan's transport and logistics system, focusing on optimizing the piggyback train schedule. Due to its strategic geographic location, Uzbekistan serves as a crucial transit hub connecting Europe and Asia. The continuous growth in freight traffic and the increasing need for greater logistics efficiency require a comprehensive approach to modernizing railway infrastructure and optimizing transportation processes. The study provides a detailed analysis of the current state of Uzbekistan's railway network, identifying key areas for improvement. Special attention is given to the implementation of piggyback transportation, which offers significant advantages such as reducing transport costs, improving cargo delivery reliability, and minimizing environmental impact. To evaluate the efficiency of transport solutions, mathematical models are applied to assess station capacity and train scheduling. A comparative analysis of different freight transportation methods is conducted using Laplace and Wald decision-making criteria, enabling the identification of the optimal transportation mode and route. The results demonstrate that a well-planned train timetable facilitates increased freight volumes, enhances logistical coordination, and strengthens Uzbekistan's role as a major transit corridor. Additionally, the study highlights the economic and operational benefits of implementing optimized piggyback train schedules. The findings of this research contribute to the development of strategies for railway infrastructure modernization, providing practical recommendations for improving freight transportation efficiency. These insights can support policymakers and industry stakeholders in making informed decisions to enhance the competitiveness of Uzbekistan's transport corridors in the global logistics network.*

***Keywords:** Uzbekistan, transport and logistics system, piggyback trains, optimization, infrastructure development.*

Актуальность исследования транспортно-логистической системы Узбекистана и графика движения контейнерных поездов объясняется его геостратегическим расположением в месте пересечения важных международных транспортных коридоров, что помогает стране развивать большой транзитный потенциал и успешно интегрироваться в систему глобальных логистических цепочек.

У Узбекистана значительные ресурсы и активно развивающаяся транспортная инфраструктура, что позволяет видеть в нем важный транзитный узел, способный нарастить объемы перевозок на территориях Центральной Азии, России и других стран. Железнодорожная инфраструктура – ключевое конкурентное преимущество страны как международного игрока. Тем важнее оценить, в каком она находится состоянии и определиться с перспективами ее эксплуатации в транспортировке грузов. Необходимо установить проблемные места и точки роста, запустить процессы модернизации, что приведет к росту лояльности партнеров.

При проведении анализа графика движения контейнерных поездов, которые важны для системы грузоперевозок в условиях отсутствия прямого выхода к морским портам международного значения, установлено, что оптимизация транспортно-логистической системы – способ уменьшить издержки, стоимость перевозок, гарантировать надежность доставки, повысить общую логистическую эффективность. Многие страны заинтересованы в эффективности логистических цепочек, что требует изучения путей оптимизации логистической системы Узбекистана. Достаточно отметить, что по итогам 2023 г. объем транзитных грузов, прошедших через территорию страны, превысил прошлогодние показатели почти на 23 %. Кроме того, страны Центральной Азии в целом нуждаются в современной магистральной инфраструктуре и рассматривают Узбекистан в качестве своеобразного флагмана в данном процессе. Целью данного исследования является комплексный анализ состояния и перспектив развития железнодорожной инфраструктуры в Узбекистане, оценка его транспортно-транзитного потенциала в системе международной логистики, обоснованности маршрутизации и эффективности графика движения контейнерных поездов, изучение его влияния на общий грузопоток и активность национальной логистики.

Обзор литературы, посвященной изучению тематики, поставленной для исследования в данной статье. Ганиев И. Г., Муртазаев Б. [1] выделяют ключевые аспекты интеграции страны в международные транспортные коридоры, что подчеркивает стратегическую роль Узбекистана как транзитного узла в Центральной Азии. Мухамедова З. Г., Эргашева З. В., Асатов Э. А. [2] сосредотачивают свое внимание на модернизации транспортной инфраструктуры страны, включая железнодорожные перевозки. Раматов Ж. С., Юлдашев Б. Э. [3] анализируют историю и перспективы развития железнодорожной сети, подчеркивая важность внедрения современных методов перевозки, включая контейнерные технологии. Расулов М. Х., Исмагуллаев А. Ф. [4] изучают возможности ускорения контейнерных перевозок, включая экономические выгоды оптимизации графиков движения поездов. Методы оптимизации графиков движения рассматривают такие авторы, как Гуламов А. А., Дадабоева З. С. [5], и обсуждают пути увеличения пропускной способности железных дорог Узбекистана. Арифджанова Н. З. [6] анализирует роль цифровизации в повышении эффективности транспортно-логистической системы, что напрямую связано с интеграцией технологий в управление графиком движения поездов.

Некоторые зарубежные ученые в области логистики и управления перевозками, такие как Notteboom T. E., Rodrigue J.-P. [7], Crainic T. G., Laporte G. [8], Geerlings H., Kuipers B. & Zuidwijk R. [9], изучают устойчивые подходы к логистике, включая интеграцию железнодорожного транспорта в мультимодальные перевозки. Исследования этих ученых посвящены анализу контейнерных перевозок, их роли в интермодальных системах и преимуществам для международной логистики.

Указанные литературные источники подчеркивают стратегическую важность Узбекистана в международной логистике, но отмечают недостаток исследований влияния графиков движения контейнерных поездов на грузопотоки. Настоящая работа восполняет этот пробел, представляя новые данные и рекомендации для улучшения логистической эффективности страны.

Оценка влияния графика движения на грузопотоки и логистическую эффективность. В настоящее время в Узбекистане все контейнерные перевозки являются транзитными. Дело в том, что согласно данным компании АО «Узбекистан темир йуллари» на грузовых станциях республики нет контейнерных терминалов [8]. Однако согласно принятой инвестиционной программе компании на период 2025 – 2030 гг. предусматривается строительство нескольких терминалов, первыми из которых будут контейнерные терминалы на станциях Ташкент-Товарная и Бухара II. Эти станции обслуживают железнодорожный маршрут Ташкент – Бухара протяженностью 623 км.

Далее необходимо рассчитать возможности обеих станций по размещению в своем расписании погрузки-отправки и приема-разгрузки дополнительных контейнерных поездов. Расчет будет произведен по времени (отражено в таблице 1) и производительности станций.

Таблица 1 – Технологические операции обработки грузового поезда со сменой локомотива

№ п/п	Технологическая операция	Продолжительность операции, мин.
1	Извещение работников железнодорожного парка о номере, пути приема и времени прибытия железнодорожного состава	1
2	Выход на путь приема работников, участвующих в обработке поезда для его встречи «с ходу»	1
3	Закрепление состава поезда, принятие от машиниста перевозочных документов	9
4	Отцепка поезда локомотива и выезд его с пути приема	5
5	Заезд локомотива на путь и прицепка локомотива к составу	5
6	Ограждение железнодорожного состава с помощью ручных переносных сигналов	17
7	Зарядка тормозной магистрали поезда	15
8	Полное апробирование тормозов железнодорожного состава, при необходимости проведение дополнительных работ по устранению неисправностей. Навешивание хвостовых сигналов, доклад о готовности	40
9	Прием под охрану вагонов состава с опасными и номенклатурными грузами	30
10	Снятие ограждения	17
11	Уборка средств закрепления состава	9
12	Вручение локомотивной бригаде перевозочной документации, отправление железнодорожного состава	5
	Общая продолжительность, мин	154

Вычисленная общая величина продолжительности обработки поезда, равная 154 мин, является минимальным временем между прибытием/отправлением грузового поезда на станции.

Определение элементов расписания прибытия-отправления поездов станции Ташкент-Товарная начнем с вычисления ежесуточного количества поездов, прибывающих под выгрузку и отправляемых загруженных поездов [9].

Согласно данным таблиц 2 и 3 на станциях существует техническая возможность погрузки-выгрузки минимум одного контейнерного поезда (при условии наличия терминала).

Используя расчетные значения количества поездов, прибывших и отправленных в сутки, вычислим величины интервалов между прибытием-отправлением поездов в каждые сутки каждого месяца с помощью стохастического моделирования методом Монте-Карло, учитывающего неравномерность движения поездов.

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

Значения интервалов между поездами (в минутах) для каждого месяца превышают минимальное время обработки поездов, приведенное в таблице 1 (154 мин), следовательно, все поезда на обеих станциях будут готовы к отправке-приему согласно требованию технологического регламента.

Таблица 2 – Расчет количества поездов под загрузку-выгрузку станции Ташкент-Товарная, ед. в сут (данные по количеству груза и вагонов на выгрузку-погрузку взяты из справки о показателях работы станции)

Месяц	Погрузка, т	Выгрузка, ваг.	Всего погрузка, ваг.	Всего выгрузка, ваг.	Погружено, сут	Выгружено, сут	Отправленные поезда, сут	Прибытие поездов, сут
Январь	101142	98108	4281	4153	143	139	2	2
Февраль	59500	57715	2286	2217	76	74	1	1
Март	92099	89336	3727	3615	124	120	2	2
Апрель	113218	109821	4732	4590	158	153	2	2
Май	105819	102644	4822	4677	161	156	2	2
Июнь	109521	106235	4494	4359	150	146	2	2
Июль	107578	104351	4741	4599	158	153	2	2
Август	119653	116063	5316	5157	177	172	3	2
Сентябрь	96951	94042	6951	6742	232	225	3	3
Октябрь	95575	92708	5575	5408	186	180	3	3
Ноябрь	95283	92425	5283	5125	176	171	3	2
Декабрь	99667	96677	4746	4604	158	153	2	2
ИТОГО	1196006	1160126	56954	55245				
Значения погрузки, выгрузки с учетом возможностей станции	2033210	1972214	96822	93917	269	261	4	4

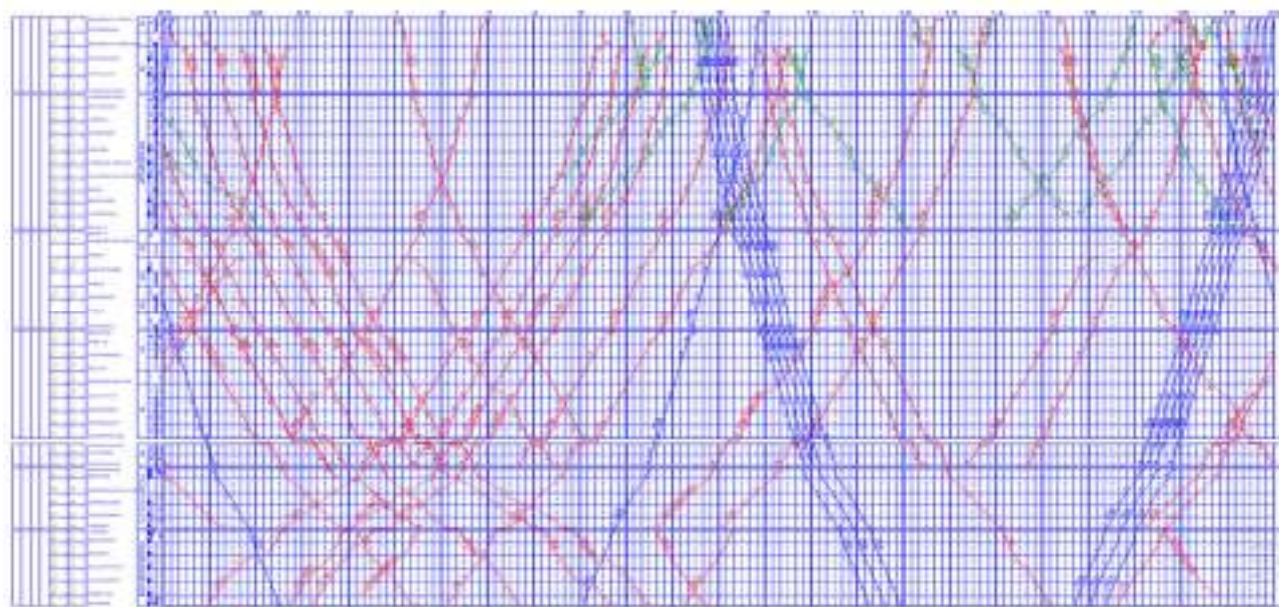
Таблица 3 – Расчет количества поездов под загрузку-выгрузку станции Бухара II, ед. в сут (данные по количеству груза и вагонов на выгрузку-погрузку взяты из справки о показателях работы станции)

Месяц	Погрузка, т	Выгрузка, ваг.	Всего погрузка, ваг.	Всего выгрузка, ваг.	Погружено, сут	Выгружено, сут	Отправленные поезда, сут	Прибытие поездов, сут
Январь	60685	58865	2569	2492	86	83	1	1
Февраль	35700	34629	1372	1330	46	44	1	1
Март	55259	53602	2236	2169	75	72	1	1
Апрель	67931	65893	2839	2754	95	92	1	1
Май	63491	61587	2893	2806	96	94	1	1
Июнь	65713	63741	2696	2616	90	87	1	1
Июль	64547	62610	2845	2759	95	92	1	1
Август	71792	69638	3190	3094	106	103	2	1
Сентябрь	58171	56425	4171	4045	139	135	2	2
Октябрь	57345	55625	3345	3245	112	108	2	2
Ноябрь	57170	55455	3170	3075	106	102	2	1
Декабрь	59800	58006	2848	2762	95	92	1	1
ИТОГО	717603,6	696075,5	34172	33147				
Значения погрузки, выгрузки с учетом возможностей станции	1219926	1183328	58093	56350	161	157		

На основе результатов проведенных расчетов (таблица 4) становится возможным представить движение контейнерных поездов на маршруте Ташкент – Бухара в графическом виде (рисунок).

Таблица 4 – Рассчитанные интервалы между поездами (месяц) на станции Ташкент-Товарная и Бухара II, мин

Станция	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноябрь	Дек.
ТТ	366	695	484	372	378	391	377	316	259	308	314	383
Б II	523	994	692	532	541	559	540	452	371	440	450	547



Фрагмент графика движения контейнерных поездов на маршруте Ташкент – Бухара

Оценка влияния графика движения на грузопотоки и логистическую эффективность. Рассчитаем доставку 40-футового контейнера тремя типами доставки (таблица 5).

Таблица 5 – Расчет доставки

Наименование типа доставки	Тариф, долл. США за 1 км	Стоимость, долл. США	Скорость доставки, км/ч	Время доставки, ч
Контейнерные перевозки 40-фут. контейнера	0,5	312	26	24
Жел.-дор. перевозки 40-фут. контейнера	0,45	280	17	37
Автоперевозки 40-фут. контейнера	2,4	1495	32	19

Чтобы сравнить два фактора – стоимость и затраченное время, рассчитаем их приведенные значения (таблица 6).

Таблица 6 – Расчет приведенных значений

Наименование типа доставки	Стоимость, долл. США	Время доставки, ч	Приведенные значения	
			стоимость	время доставки
Контейнерные перевозки 40-фут. контейнера	312	24	0,21	0,65
Жел.-дор. перевозки 40-фут. контейнера	280	37	0,19	1,00
Автоперевозки 40-фут. контейнера	1495	19	1,00	0,53
Максимальное значение показателя	1495	37		

Приведенные значения представляют собой потери (по стоимости и времени доставки). Поэтому нужно выбрать такой тип доставки, где потери будут минимальными.

Для определения наиболее рационального типа доставки рассчитаем критерии принятия решений в условиях неопределенности. Наиболее известны критерии Лапласа и Вальда, позволяющие принять решение в условиях неопределенности на основе анализа матрицы возможных результатов. Метод Монте-Карло позволяет учитывать стохастическую природу движения поездов, тогда как критерии Лапласа и Вальда помогают оценить оптимальность предложенных маршрутов с точки зрения стоимости и времени доставки [11].

Критерий Лапласа опирается на принцип недостаточного основания, согласно которому все состояния природы S_i , где $i = [1, n]$, полагаются равновероятными. Таким образом, каждому состоянию S_i соответствует вероятность $q = 1/n$. Для принятия решения для каждого действия R_j вычисляется среднее арифметическое значение потерь:

$$M_j(R) = \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n V_{ji} \right), \quad (1)$$

где V_{ji} – потери для действия R_j в состоянии S_i .

Среди $M_j(R)$ выбирают минимальное значение, учитывая, что матрица возможных результатов представлена матрицей потерь, которое и будет соответствовать оптимальной стратегии:

$$W = \min_j(R_j(R)), \quad (2)$$

где W – значение параметра, соответствующее оптимальной стратегии (типу доставки груза),

R_j – альтернативные стратегии транспортировки грузов, такие как контейнерные, железнодорожные перевозки и автоперевозки;

min – минимизация среди небольших потерь.

Критерий Вальда (критерий минимума-максимума или максимума-минимума) основан на принципе наибольшей осторожности. В случае, когда результат представляет собой потери, при выборе оптимальной стратегии используется минимаксный критерий.

На первом этапе расчета необходимо найти в каждой строке наибольший элемент $\max\{V_{ji}\}$, а далее выбирается действие R_j (строка j), которому будет соответствовать наименьший элемент из этих наибольших элементов:

$$W = \min_j(\max(V_{ji})). \quad (3)$$

Вычислим оптимальный тип перевозки по критерию Лапласа (таблица 7).

Таблица 7 – Расчет по критерию Лапласа

Тип доставки	Время	Стоимость	Среднее арифметическое
Контейнерные перевозки 40-фут. контейнера	0,21	0,65	0,43
Жел.-дор. перевозки 40-фут. контейнера	0,19	1,00	0,59
Автоперевозки 40-фут. контейнера	1,00	0,53	0,77
Минимум достигается при контейнерном типе доставки			0,43

Полученные значения соответствуют критерию Лапласа, где берется среднее арифметическое потерь. Минимальное значение по критерию Лапласа 0,43 получено для контейнерных перевозок.

Вычислим также оптимальный тип перевозки по критерию Вальда (таблица 8).

По критерию Вальда минимизируются максимальные потери. Полученное минимальное значение максимальных потерь – 0,65, что соответствует требованиям к контейнерным перевозкам.

Таким образом, тип маршрута, оптимальный с точки зрения затрат и времени – контрейлерный.

Таблица 8 – Расчет по критерию Вальда

Тип доставки	Время	Стоимость	Среднее арифметическое
Контрейлерные перевозки 40-фут. контейнера	0,21	0,65	0,65
Жел.-дор. перевозки 40-фут. контейнера	0,19	1,00	1,00
Автоперевозки 40-фут. контейнера	1,00	0,53	1,00
Минимум достигается при контрейлерном типе доставки			0,65

При проведении анализа состояния и перспектив развития железнодорожной инфраструктуры Узбекистана выясняется, что у страны есть значительный потенциал, чтобы модернизировать логистику и стать полноправным участником системы международных перевозок. По этой причине проходят процессы по замене устаревшего подвижного состава, увеличению пропускной способности. Такие возможности у страны имеются в виду уникальности ее расположения: Узбекистан – территория, где пересекаются ключевые торговые маршруты, что позволяет ему стать значимым транзитным узлом, а следовательно – повысить экономическую эффективность.

В частности, анализ показал, что в период с 2018 по 2019 г. наблюдался рост грузопотока по всем видам перевозок. Однако в результате кризиса, вызванного пандемией в 2020 г., темпы роста обоих грузопотоков замедлились, после чего в посткризисные годы они вновь начали увеличиваться. При этом темпы роста автомобильных перевозок уменьшались на протяжении всего периода, за исключением 2023 г. В то же время темпы прироста железнодорожных перевозок отличаются большей волатильностью (изменчивостью).

Тем важнее для оптимизации грузопотока и повышения логистической эффективности обосновать маршруты и проанализировать график движения контрейлерных поездов. Четкий график движения улучшает координацию участников логистической цепочки, снижает затраты на перевозку, что увеличивает конкурентоспособность узбекской продукции на международном рынке.

В ходе исследования был разработан и проанализирован маршрут Ташкент – Бухара. Для определения наиболее рационального типа доставки были рассчитаны критерии принятия решений в условиях неопределенности. По критериям Лапласа и Вальда минимум потерь достигается при контрейлерном типе доставки (значение 0,43) по сравнению с железнодорожными и автомобильными перевозками.

Проведение оценки влияния графика движения контрейлерных поездов на общий грузопоток доказывает, что от грамотно спланированной логистики увеличиваются объемы грузоперевозок, снижения таможенных барьеров, улучшается обслуживание потребителей, грузоотправителей, растет общая эффективность системы железных дорог. Процесс оптимизации графика движения контрейлерных поездов – важный шаг, который призван укрепить позиции Узбекистана в сфере международной логистики, активизировать экспорт-импорт и обеспечить устойчивый экономический рост. Это позволит стране устойчиво развиваться и успешно интегрироваться в пространство международной торговли.

Список литературы

1. Ганиев, И. Г. Перспективные транзитные коридоры Узбекистана / И. Г. Ганиев, Б. Муртазаев. – Текст : непосредственный // Me'morchilik va qurilish muammolari (Проблемы архитектуры и строительства). – 2021. – № 4. – С. 152–154.
2. 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. – EDN AGXUXQ.

3. Раматов, Ж. С. Железные дороги Узбекистана: история, сегодня, перспективы / Ж. С. Раматов, Б. Э. Юлдашев. – Текст : непосредственный // Транспорт шёлкового пути. – 2019. – № 1-2. – С. 10–14. – EDN FWYYLQ.
4. Расулов, М. Х. О перспективах развития ускоренных контейнерных перевозок в Узбекистане / М. Х. Расулов, А. Ф. Исмагуллаев. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2021. – № 1 (39). – С. 50–54. – DOI 10.20291/2311-164X-2021-1-50-54. – EDN XRYYWY.
5. Гуламов, А. А. Проблемы развития железнодорожного транзитного потенциала Республики Узбекистан / А. А. Гуламов, З. С. Дадабоева. – Текст : электронный // Universum: технические науки. – 2020. – №. 5 (74). – С. 64–67. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9400> (дата обращения: 31.01.2025).
6. Арифджанова, Н. З. Условия цифровизации транспортно-логистической системы / Н. З. Арифджанова. – Текст : непосредственный // Наука и образование сегодня. – 2021. – № 6 (65). – С. 9–11. – EDN FRWDHT.
7. Notteboom, T. E., & Rodrigue, J. P. (2005). Port regionalization: towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, 32(3), 297-313. DOI: 10.1080/03088830500139885.
8. Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European journal of operational research*, 97(3), 409-438. DOI: 10.1016/s0377-2217(96)00298-6.
9. Geerlings, Harry & Kuipers, Bart & Zuidwijk, Rob. (2018). Ports and networks: Strategies, operations and perspectives. London : Routledge. ISBN: 978-1-4724-8503-8.
10. Корпоративное управление. Отчеты АО // railway.uz : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://railway.uz/ru/proekty/9018/> (дата обращения: 10.12.2024).
11. Илесалиев, Д. И. Перспективы и направления транспортного развития Узбекистана в условиях формирования железных дорог Афганистана / Д. И. Илесалиев, Ш. Г. Махматкулов. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2020. – № 3 (37). – С. 3–6. – DOI 10.20291/2311-164X-2020-3-3-6. – EDN CXBXJI.
12. Мухамедова, З. Г. Анализ вариантов размещения грузовых объектов на сети железных дорог Узбекистана / З. Г. Мухамедова, Г. М. Юлдашова. – Текст : электронный // Journal of innovations in scientific and educational research. – 2023. – Т. 6. – № 10. – С. 170–176. – URL: <https://bestpublication.org/index.php/jaj/article/view/8104> (дата обращения: 31.01.2025).

References

1. Ganiev I.G., Murtazaev B. Prospective transit corridors of Uzbekistan. *Mémorchilik va Qurilish muammolari – Problemy arkhitektury i stroitel'stva – Problems of Architecture and Construction*, 2021, no. 4, pp. 152-154. (In Russian).
2. 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. EDN AGXUXQ. (In Russian).
3. Ramatov Ju.S., Yuldoshev B.E. Railways of Uzbekistan: history, today, prospects. *Transport shelkovogo puti – Transport of the Silk Road*, 2019, no. 1-2, pp. 10-14. EDN FWYYLQ. (In Russian).
4. Rasulov M.X., Ismatullaev A.F. Prospects for the development of accelerated container transportation in Uzbekistan. *Innovatsionnyi transport – "Innotrans" Journal*, 2021, no. 1 (39), pp. 50-54. DOI 10.20291/2311-164X-2021-1-50-54. EDN XRYYWY. (In Russian).
5. Gulamov A., Dadaboyeva Z. Problems of development of the railway transit potential of the Republic of Uzbekistan. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: technical sciences*, 2020, no. 5 (74), pp. 64-67. (In Russian). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/9400> (accessed 31.01.2025).
6. Arifdzhanova N.Z. Conditions of digitalization of the transport and logistics system. *Nauka i obrazovanie segodnia – Science and education today*, 2021, no. 6 (65), pp. 9-11. EDN FRWDHT. (In Russian).

7. Notteboom, T. E., & Rodrigue, J. P. (2005). Port regionalization: towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, 32(3), 297-313. DOI: 10.1080/03088830500139885.
8. Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European journal of operational research*, 97(3), 409-438. DOI: 10.1016/s0377-2217(96)00298-6.
9. Geerlings, Harry & Kuipers, Bart & Zuidwijk, Rob. (2018). Ports and networks: Strategies, operations and perspectives. London : Routledge. ISBN: 978-1-4724-8503-8.
10. *Korporativnoe upravlenie. Otchety AO* [Corporate governance. JSC reports]. Available at: <https://railway.uz/ru/proekty/9018/> (accessed 10.12.2024).
11. Ilesaliev D.I., Makhmatkulov Sh.G. Prospects and directions of transport development of Uzbekistan in the context of formation of railways in Afghanistan. *Innovatsionnyi transport – "Innotrans" Journal*, 2020, no. 3 (37), pp. 3-6. DOI 10.20291/2311-164X-2020-3-3-6. EDN CXBXJI. (In Russian).
12. Mukhamedova Z.G., Yuldashova G.M. Analysis of the placement options for cargo facilities on the railway network of Uzbekistan. *Journal of innovations in scientific and educational research*, 2023, vol. 6, no. 10, pp. 170-176. (In Russian). Available at: <https://bestpublication.org/index.php/jaj/article/view/8104> (accessed 31.01.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухамедова Зиёда Гафурджановна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

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

Тел.: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Ахмедов Сардорбек Хурматбекович

АО «Узбекистон темир йуллари».

Тараса Шевченко ул., д. 7 а, г. Ташкент, 100060, Республика Узбекистан.

Начальник департамента международного сотрудничества.

Тел.: + 998 (90) 189-00-04.

E-mail: sxahmedov@yandex.ru

Юлдашова Гузал Мэлсовна

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).

Темирийлчилар ул., д. 1, г. Ташкент, 100067, Республика Узбекистан.

Студент бакалавриата по направлению подготовки «Организация грузоперевозок и транспортная логистика», ТГТУ.

Тел.: + 998 (99) 126-18-69.

E-mail: guzaluldashova497@mail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мухамедова, З. Г. Разработка транспортно-логистической системы Узбекистана и графика движения контейнерных поездов / З. Г. Мухамедова, С. Х. Ахмедов, Г. М. Юлдашова. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 124 – 132.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mukhamedova Ziyoda Gafurdjanovna

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriylchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Doctor Of Sciences in Engineering, associate professor of the department «Transport and cargo systems», TSTU.

Phone: + 998 (90) 329-83-00.

E-mail: mziyoda@mail.ru

Akhmedov Sardorbek Khurmatbekovich

Uzbekiston Temir Yullari JSC.

7 A, Taras Shevchenko st., Tashkent, 100060, Republic of Uzbekistan.

Head of the International Cooperation Department

Phone: + 998 (90) 189-00-04.

E-mail: sxahmedov@yandex.ru

Yuldashova Guzal Mels qizi

Tashkent State Transport University (TSTU).

1, Temiriylchilar st., Tashkent, 100067, Republic of Uzbekistan.

Undergraduate student, specialization «Organization of cargo transportation and transport logistics», TSTU.

Phone: + 998 (99) 126-18-69.

E-mail : guzaluldashova497@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mukhamedova Z.G., Akhmedov S.Kh., Yuldashova G.M. Development of the transport and logistics system of Uzbekistan and the timetable for the movement of piggyback trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1 (61), pp. 124-132. (In Russian).

А. А. Комяков, Ю. В. Заренкова, А. С. Голубков

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

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ ДВИЖЕНИЯ ТАКСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕТИ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Аннотация. Стремление к снижению выбросов углекислого газа и переход на электрический транспорт становятся ключевыми направлениями развития транспортной инфраструктуры в городах и агломерациях европейской части России. Для эффективного перехода на электромобили возникает необходимость разработки сети зарядных станций, способной удовлетворить растущий спрос на экологически чистые виды транспорта. Предметом исследования является анализ пространственно-временных характеристик движения автомобилей для оптимизации размещения зарядной инфраструктуры. Цель работы – разработка методического подхода к определению зон концентрации транспортной активности на основе реальных данных, что позволит обоснованно выбирать места для установки зарядных станций. В данной статье рассматривается подход применения алгоритма кластеризации DBSCAN с целью анализа пространственно-временных характеристик движения автомобилей на основе реальных данных о поездках такси в городе Омске. Данный алгоритм реализован на языке программирования Python. В ходе исследования были выделены основные пространственно-временные закономерности движения такси в исследуемом регионе и выполнено объединение начальных и конечных точек маршрутов такси в обоснованные кластеры. Проведенный анализ позволяет выявить основные зоны концентрации транспортной активности, что формирует основу для дальнейшего моделирования транспортных потоков с целью оптимизации размещения зарядной инфраструктуры, развитие сети зарядных станций для электромобилей и оптимизацию транспортных потоков. Выводы исследования подтверждают эффективность использования алгоритма DBSCAN для выявления зон высокой транспортной активности, что может существенно повысить качество планирования зарядной инфраструктуры и ускорить переход к экологически чистому транспорту.

Ключевые слова: электромобили, зарядная инфраструктура, кластеризация, метод DBSCAN, городской транспорт, транспортные системы.

Alexander A. Komyakov, Julia V. Zarenkova, Anton S. Golubkov

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

APPLICATION OF THE ANALYSIS OF SPATIOTEMPORAL PATTERNS OF TAXI MOVEMENT USING CLUSTERING ALGORITHMS IN THE DESIGN OF THE CHARGING INFRASTRUCTURE NETWORK FOR ELECTRIC VEHICLES

Abstract. The desire to reduce carbon dioxide emissions and the transition to electric transport are becoming key areas for the development of transport infrastructure in cities and agglomerations of the European part of Russia. For an effective transition to electric vehicles, it is necessary to develop a network of charging stations capable of meeting the growing demand for environmentally friendly modes of transport. The subject of the study is the analysis of the spatial and temporal characteristics of the movement of cars to optimize the location of the charging infrastructure. The aim of the work is to develop a methodological approach to determining the concentration zones of transport activity based on real data, which will make it possible to reasonably select locations for the installation of charging stations. This article discusses the approach of using the DBSCAN clustering algorithm to analyze the spatial and temporal characteristics of car movement based on real data on taxi rides in Omsk. This algorithm is implemented in the Python programming language. In the course of the study, the main spatial and temporal patterns of taxi movement in the studied region were identified and the initial and final points of taxi routes were combined into well-founded clusters. The analysis makes it possible to identify the main areas of concentration of transport activity, which forms the basis for further modeling of traffic flows in order to optimize the location of the charging infrastructure. The scope of the results includes the planning of urban transport infrastructure, the development of a network of charging stations for electric vehicles and the optimization of traffic flows. The findings of the study confirm the effectiveness of using the DBSCAN algorithm to identify areas of high traffic activity, which can significantly improve the quality of charging infrastructure planning and accelerate the transition to environmentally friendly transport.

Keywords: electric vehicles, charging infrastructure, clustering, DBSCAN method, urban transport, transport systems.

Электрификация городского транспорта и реализация целей по сокращению выбросов углекислого газа для регионов России становятся устойчивым трендом развития транспортной инфраструктуры. Однако чтобы подготовить города и регионы к переходу на электромобили, требуется создать эффективную сеть зарядной инфраструктуры, которая будет увеличивать тренд, направленный на пользование экологичными видами транспорта. Исследование [1] подчеркивает важность экологических требований к автотранспорту и необходимость внедрения экологически чистых, ресурсосберегающих и энергетически эффективных транспортных технологий. Внедрение таких технологий может способствовать созданию более устойчивой и экологически чистой транспортной системы, что является очень важным аспектом для удовлетворения современных экологических стандартов и потребностей пользователей. Следует отметить, что такие исследования, как [2], подчеркивают значимость эффективной и доступной зарядной инфраструктуры для успешного внедрения электромобилей.

Целью текущего исследования является разработка методологии анализа движения такси с использованием алгоритмов кластеризации и использования полученных результатов для проектирования сети зарядной инфраструктуры. Ожидается, что предложенный подход позволит создать эффективную устойчивую сеть зарядной инфраструктуры.

Анализ пространственно-временных паттернов движения автомобилей с использованием алгоритмов кластеризации представляет собой значимое направление исследований в контексте создания эффективной сети зарядной инфраструктуры. В данном разделе статьи рассматривается обзор существующих методов и подходов, используемых для анализа движения автомобилей и размещения зарядной инфраструктуры. Кластерный анализ является одним из ключевых методов анализа данных, позволяющих выявлять скрытые структуры и паттерны в больших объемах данных. В статье [3] предложен метод прогнозирования пространственно-временного распределения нагрузки на зарядные станции для электромобилей с применением метода Монте-Карло. В контексте рассматриваемого исследования данный метод может быть полезен для анализа временных характеристик поездок такси. В исследовании [4] рассматриваются применение кластерного анализа для выявления паттернов поведения путешественников и сегментация пользователей на основе данных об их перемещениях. Основным методом в данном исследовании является алгоритм кластеризации *k-means* для выявления схожих групп пользователей в отличие от рассматриваемого подхода, где предлагается использовать алгоритм кластеризации DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) с целью сегментации маршрутов такси для определения зон с наибольшей потребностью в зарядных станциях. В работе [5] новым направлением исследований является применение интегрированных алгоритмов для краткосрочного прогнозирования нагрузки на зарядные станции. В исследовании подчеркивается актуальность использования пространственно-временных моделей для прогнозирования потребностей в зарядной инфраструктуре. Из данной работы можно сделать вывод о целесообразности проведения кластеризации наших данных в течение суток и возможности адаптировать алгоритм DBSCAN, применяя разные значения EPS (радиус для определения соседства точки) в зависимости от времени суток и плотности данных. В исследовании [6] используется алгоритм *k-means* для кластеризации маршрутов электромобилей с целью определения местоположения зарядных станций. Для оптимизации числа зарядных станций с целью снижения очередей для пользователей применяется теория очередей. Следует отметить, что алгоритм *k-means* требует заранее заданного числа кластеров, что является проблемой, если число таких кластеров неочевидно. В нашем исследовании использование алгоритма DBSCAN может помочь избежать данной проблемы, так как DBSCAN не требует предварительного задания числа кластеров, при этом автоматически выявляет области высокой плотности, что является важным аспектом для анализа маршрутов такси. Также рассматриваемое исследование не учитывает изменения в поведении водителей в разное время суток, что является недостатком для задач, связанных с анализом маршрутов

такси, где время суток имеет глубокий смысл. Авторы работы [7] в своем исследовании используют модель на основе ГИС для оптимизации размещения зарядных станций. Указанное исследование опирается на реальные данные, что позволяет более точно моделировать потребности в зарядных станциях. Проблема оптимального размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей описана также в трудах отечественных ученых Т. Р. Гареева, Д. Ю. Каталевского [8], А. А. Мишкиной [9], Ю. С. Яковлева, Н. В. Поживилова [10], П. Ю. Бучацкого, С. В. Теплоухова, С. В. Онищенко [11].

Описание исходных данных. Для проведения пространственно-временного анализа движения автомобилей с использованием алгоритмов кластеризации были использованы реальные данные о поездках такси в городе Омске за период с 22 по 28 октября 2024 г. Город Омск является одним из крупнейших промышленных городов России с населением более 1 млн человек. Структура данных включала в себя несколько ключевых параметров. Данные были представлены в виде CSV-файла, содержащего 58 175 строк, где каждая строка представляла одну поездку такси, а столбцы содержали информацию, относящуюся к конкретным характеристикам поездки: уникальный идентификатор поездки, присваиваемый каждой записи в базе данных; начальная и конечная точки маршрута; дата подачи и дата завершения поездки. Перед запуском алгоритма кластеризации данные прошли несколько этапов предварительной обработки. Для каждой поездки все столбцы были проверены на предмет пропусков в контексте отмененных заявок такси. В случае обнаружения пропусков в критических столбцах записи были удалены, так как они не могли быть использованы для анализа. Следует отметить, что была выполнена работа по преобразованию адресных данных в географические координаты с помощью такого инструмента, как сервис геокодирования nominatim.org. Данная обработка позволила получить структурированные данные поездок такси.

Обзор алгоритмов кластеризации и выбор оптимального алгоритма кластеризации в контексте анализа пространственно-временных паттернов движения автомобилей. В контексте решения задачи анализа пространственно-временных характеристик движения такси можно использовать различные методы кластеризации. В работе [12] авторы выделяют четыре типа методов кластеризации: методы секционирования, методы плотности, сеточные методы, иерархические методы. В рассматриваемом исследовании была составлена сравнительная характеристика основных методов кластеризации, представленная в таблице. Данная таблица составлена на основе работ [12 – 16]. Необходимо отметить, что было проведено предварительное исследование на применение алгоритма кластеризации *k-means* в контексте анализа пространственно-временных данных поездок такси. По итогам проведенного обзора существующих алгоритмов кластеризации и предыдущего опыта применения алгоритма *k-means* для анализа пространственно-временных паттернов движения такси был сделан вывод о том, что алгоритм DBSCAN является более эффективным инструментом для кластеризации данных поездок такси в контексте плотности и временных характеристик. Данный выбор базируется на способности алгоритма DBSCAN работать с данными произвольной формы, устойчивостью к выбросам и отсутствием необходимости заранее задавать количество кластеров. В качестве инструмента для реализации алгоритма кластеризации DBSCAN в рамках данного исследования был выбран язык программирования Python.

Методология применения алгоритма DBSCAN. На первом этапе исследования был проведен комплексный анализ пространственно-временных данных маршрутов такси с применением алгоритма кластеризации DBSCAN. В данной версии алгоритма делается акцент на привязку к временным данным по поездкам такси. Такой подход направлен на выделение кластеров поездок с целью выявления зон концентрации спроса и оценки плотности движения такси в зависимости от времени суток.

Сравнительная характеристика основных методов кластеризации

Наименование метода	Ключевые преимущества	Недостатки	Вероятностное применение
К-средних (K-MEANS)	Метод является простым и быстрым, эффективен для кластеризации данных, которые могут быть разделены на компактные и округлые группы. Хорошо масштабируется на большие объемы данных	Необходимость заранее заданного числа кластеров K, чувствительность к выбросам и начальной инициализации центроидов, отсутствие точности при работе с кластерами разной плотности	Целесообразно использовать в случае заранее известного количества кластеров, где данные имеют четкую структуру с относительно одинаковой плотностью точек в каждом кластере
Иерархическая кластеризация	Не требует предварительного задания числа кластеров, позволяет исследовать данные на разных уровнях детализации и строить дендрограмму, что является полезным инструментом для анализа иерархий	Высокая вычислительная сложность, в особенности на больших объемах данных, проблема с качеством кластеризации при наличии выбросов	Применяется для анализа иерархий и структуры данных, когда важно понимать, как кластеры могут быть объединены или разделены на различных уровнях
DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)	Не требует предварительного задания числа кластеров, способен выявлять кластеры произвольной формы, устойчив к шуму и выбросам	Требует настройки параметров EPS и minPts	Подходит для данных с произвольной формой кластеров, вариациями в плотности и при наличии выбросов. Особенно эффективен для кластеризации пространственных данных
Самоорганизующиеся карты (SOM, Self-Organizing Maps)	Устойчивая работа с высокоразмерными данными, наглядная визуализация сложных структур данных	Высокая вычислительная сложность, требует настройки параметров карты, трудоемкая интерпретация результатов в случае с большим объемом данных	Кластеризация высокоразмерных данных, применение при необходимости визуализации в двумерном пространстве
Модели смешанных гауссовых распределений (GMM, Gaussian Mixture Model)	Подходит для кластеров, которые могут быть описаны многомерными нормальными распределениями, позволяет учитывать вероятностные связи между точками данных	Необходимость заранее заданного числа кластеров K, чувствителен к выбору начальных параметров	Рекомендуется, когда данные могут быть аппроксимированы гауссовым распределением и требуется более гибкая модель кластеров с вероятностной интерпретацией

Предварительно была проведена работа по построению графа транспортной сети города Омска с помощью использования библиотеки OSMnx [17]. Был загружен граф транспортной сети на основе данных OpenStreetMap. В контексте географического фильтра координаты широты изменяются в пределах от 54.825 до 55.200 со средним квадратическим отклонением 0,035, а координаты долготы – от 73.200 до 73.500 со средним квадратическим отклонением 0,061. Для каждой точки начала и завершения поездки были найдены ближайшие вершины графа соответственно. Данная привязка важна в контексте дальнейших расчетов расстояний, так как позволяет использовать топологическую структуру графа вместо прямолинейных расстояний на карте, как это было реализовано на алгоритме k-means в предыдущих



Рисунок 1 – Пример построения кратчайшего расстояния на графе транспортной сети г. Омска

исследованиях авторов. Для каждой пары точек было рассчитано кратчайшее расстояние по графу с минимизацией времени в пути. Пример построения кратчайшего расстояния на графе транспортной сети г. Омска представлен на рисунке 1. Данный расчет выполнен с использованием алгоритма Дейкстры, который встроен в библиотеку OSMnx. Пусть граф $G = (V, E)$ состоит из множества вершин V и ребер E , а вес ребра между вершинами u и v обозначен как $w(u, v)$. В уравнении (1) представлено нахождение минимального расстояния

$$d(u, v) = \min(\sum_{(i,j) \in P} w(i, j)), \quad (1)$$

где P – путь от u до v .

Описание полного цикла алгоритма DBSCAN представлено в виде блок-схемы на рисунке 2.

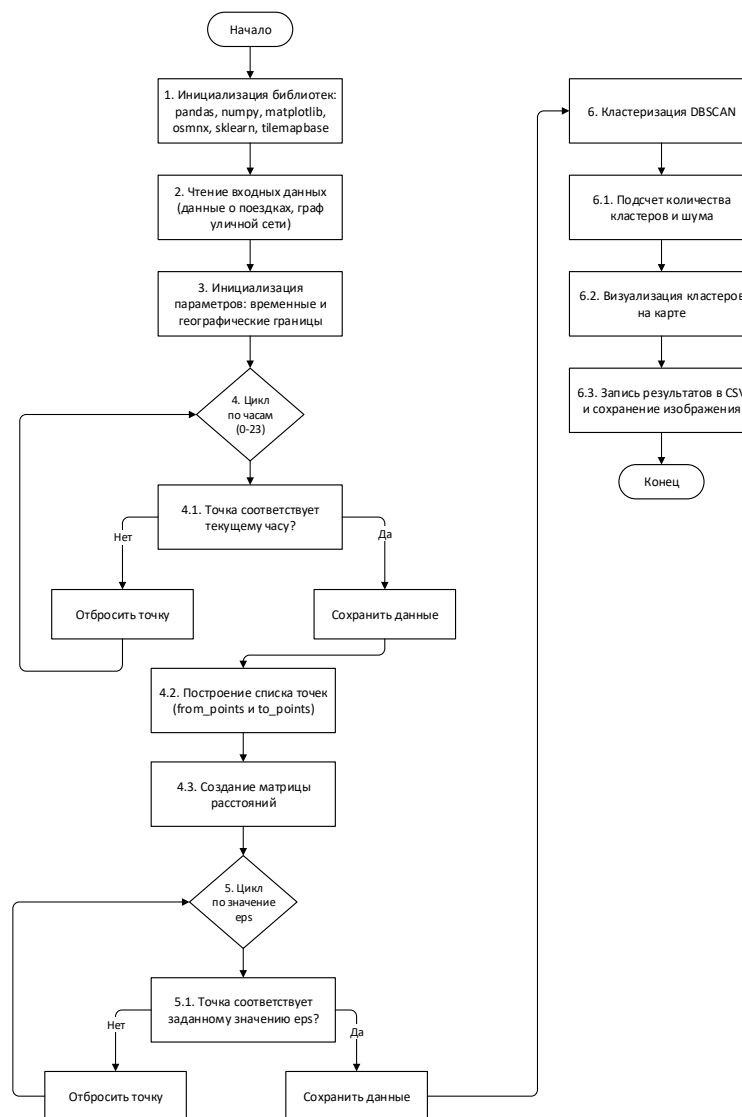


Рисунок 2 – Алгоритм кластеризации поездок такси

Кластеризация поездок такси была проведена в заданном диапазоне EPS от 0,1 км до 2 км для каждого часа в течение суток. По итогам кластеризации была выполнена работа по интерпретации результатов пространственно-временной кластеризации с целью оптимизации размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей. Во-первых, ключевым этапом при анализе результатов кластеризации является идентификация стабильных кластеров, сохраняющихся в различных временных интервалах при фиксированном значении EPS, выбранном по итогам проведенного эксперимента кластеризации с 20 различными значениями EPS. В результате данного эксперимента было выбрано значение $EPS = 0,8$. Данный выбор был сделан по итогам проведенной кластеризации поездок такси в диапазоне значений EPS от 0,1 до 2,0 и обоснован результатами комплексного анализа статистических данных, полученных в результате кластеризации. Были построены графики зависимости числа кластеров от значения EPS для каждого часа суток, где прослеживается тенденция к относительной стабилизации числа кластеров при достижении значения $EPS = 0,8$. Пример графика зависимости числа кластеров от значения EPS представлен на рисунке 3.

06:00 – 06:59

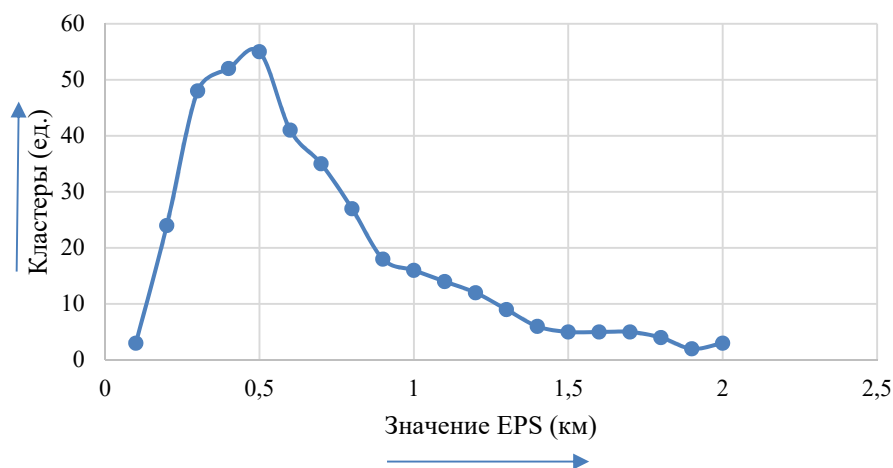


Рисунок 3 – График зависимости числа кластеров от значения EPS во временном диапазоне 06.00 – 06.59

Для всех значений EPS был проведен расчет процента выбросов, точек, которые не попали в кластеры. Результаты показывают, что при значении $EPS = 0,8$ процент выбросов находится в диапазоне 10 – 15 %, что является оптимальным в контексте качества проведенной кластеризации. В то время как при большем значении EPS (например, $EPS = 1,6$) процент выбросов существенно снижается до 1 – 5 %, что указывает на агрессивную кластеризацию, когда много данных объединяется в несколько крупных кластеров. В случае более низкого значения EPS (например $EPS = 0,5$) происходит резкое увеличение процента выбросов до 50 %, что говорит о высокой разрозненности данных. Визуальная оценка кластеров показала также, что при $EPS = 0,8$ кластеры представлены наиболее четко и разделены на логичные группы в контексте кластеризации поездок такси с целью размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей.

В результате проведенного анализа пространственно-временных характеристик движения автомобилей в исследуемом регионе были выделены кластеры для каждого часа в течение одних суток при значении $EPS = 0,8$. Количество полученных кластеров варьирует от 16 до 33 в зависимости от времени суток, но в целом можно выделить несколько крупных кластеров, которые стабильно сохраняются и могут соответствовать основным районам с высокой активностью поездок такси. Наибольшее количество точек в кластерах наблюдается в период с 19.00 до 19.59 (4885 точек), а наименьшее – с 04.00 до 04.59 (886 точек). Можно сделать вывод о том, что в вечернее время активность поездок достигает пиковой точки, при этом количество кластеров и точек в данный период остается высоким, а процент выбросов

снижается до 6 %. На рисунке 4 представлена зависимость количества точек в кластерах от временного диапазона.

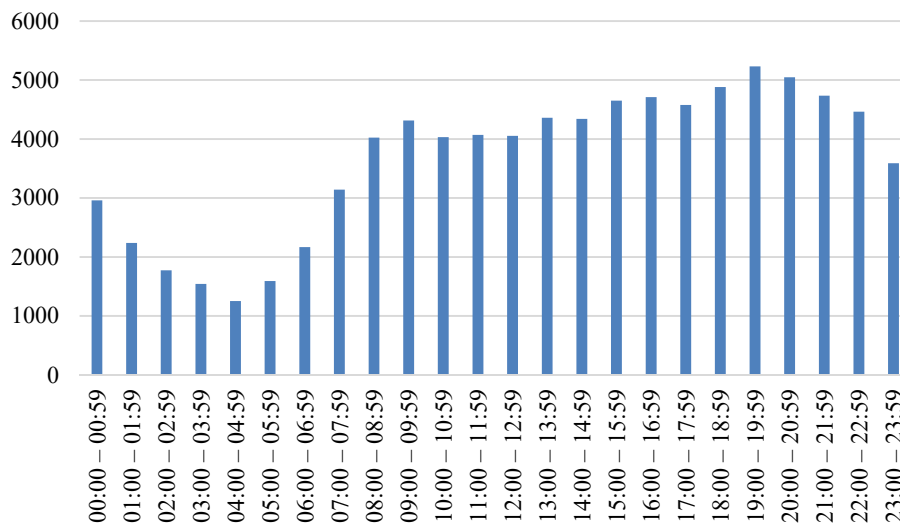


Рисунок 4 – График зависимости числа точек в кластерах от временного диапазона

При анализе кластеров по времени суток можно выделить основные закономерности в ночные, утренние, дневные и вечерние часы.

Ночные часы (00.00 – 05.59). Количество кластеров варьируется от 18 до 20. Наиболее крупные кластеры фиксируются в Центральном, Кировском и Советском округах. На рисунках 5 и 6 представлены результаты визуализации кластеров во временных диапазонах 02.00 – 02.59 и 05.00 – 05.59 соответственно.

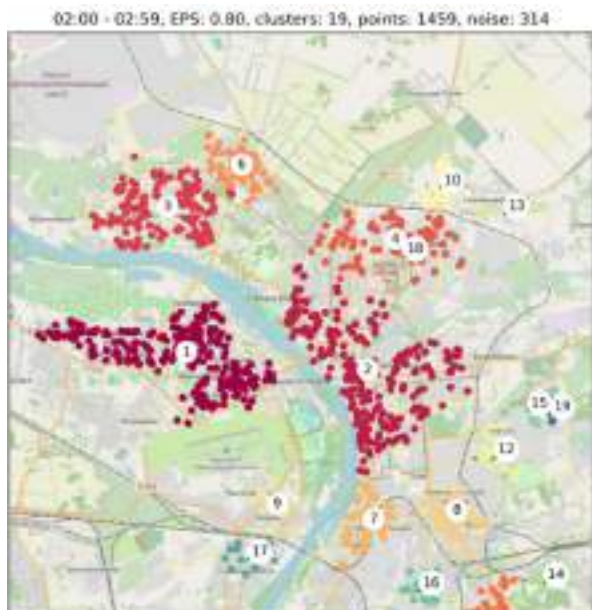


Рисунок 5 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 02.00 – 02.59



Рисунок 6 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 05.00 – 05.59

Утренние часы (06.00 – 11.59). Количество кластеров варьируется от 18 до 27. Наиболее крупные кластеры фиксируются в Центральном, Кировском и Советском округах. На рисунках 7 и 8 представлены результаты визуализации кластеров во временных диапазонах 07.00 – 07.59 и 10.00 – 10.59 соответственно.

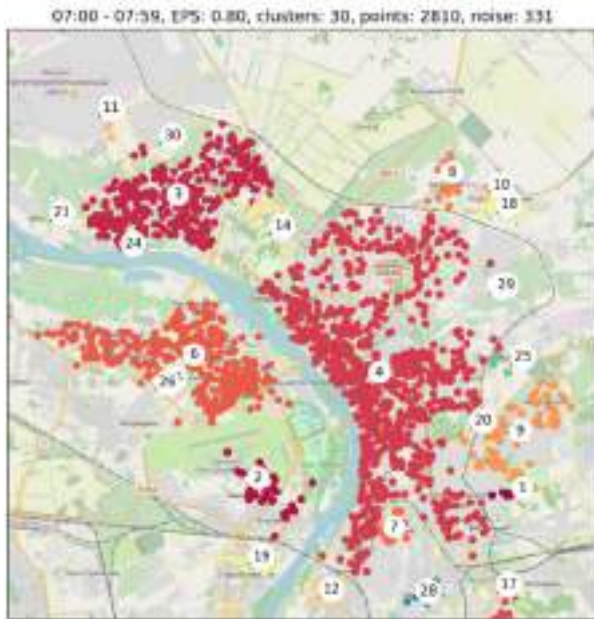


Рисунок 7 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 07.00 – 07.59

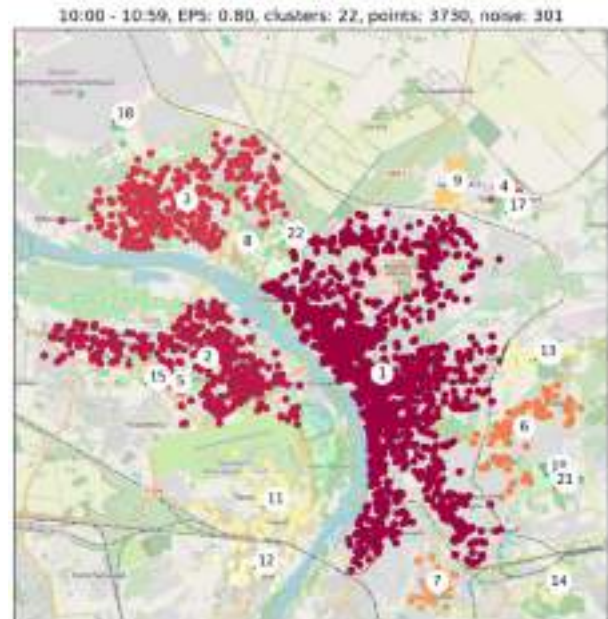


Рисунок 8 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 10.00 – 10.59

Дневные часы (12.00 – 17.59). Количество кластеров варьируется от 18 до 23. Наиболее крупные кластеры фиксируются в Центральном, Кировском, Советском и Октябрьском округах. На рисунках 9 и 10 представлены результаты визуализации кластеров во временных диапазонах 13.00 – 13.59 и 16.00 – 16.59 соответственно.

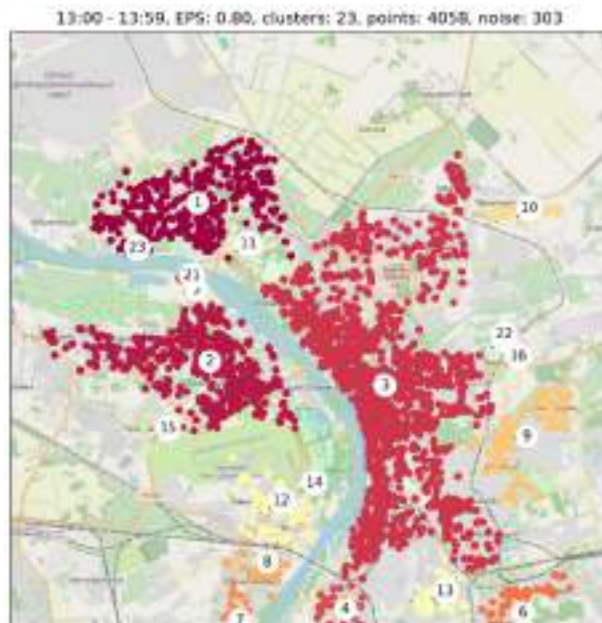


Рисунок 9 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 13.00 – 13.59

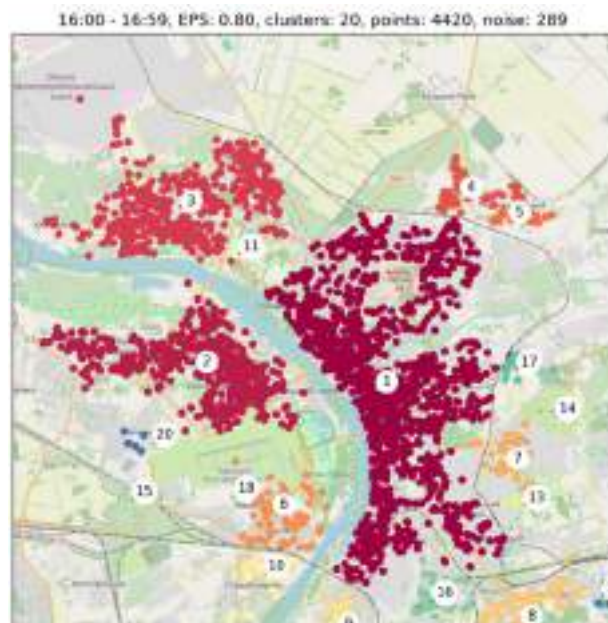


Рисунок 10 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 16.00 – 16.59

Вечерние часы (18.00 – 18.59). Количество кластеров варьируется от 16 до 33. Наиболее крупные кластеры фиксируются в Центральном, Кировском, Советском и Октябрьском округах. На рисунках 11 и 12 представлены результаты визуализации кластеров во временных диапазонах 19.00 – 09.59 и 21.00 – 21.59 соответственно.

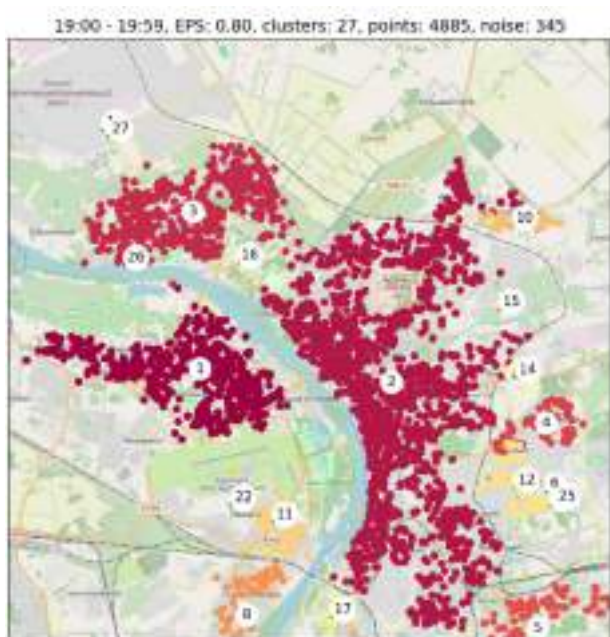


Рисунок 11 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 19.00 – 19.59

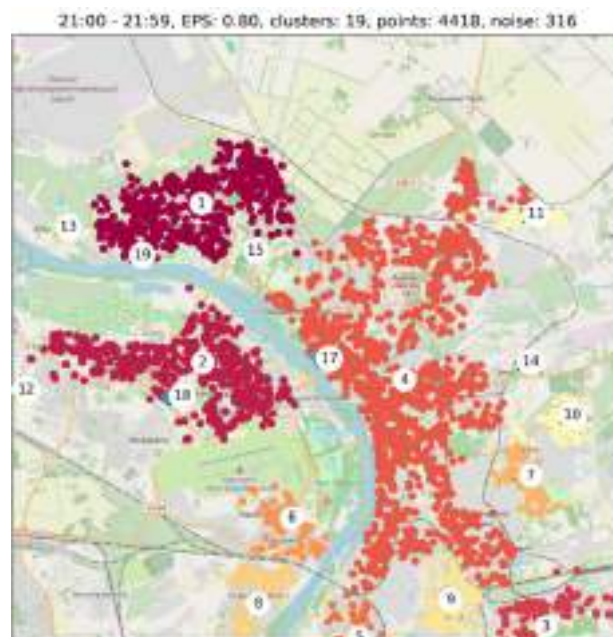


Рисунок 12 – Кластеризация поездок такси во временном интервале 21.00 – 21.59

В результате проведенной кластеризации методом DBSCAN были выделены стабильные кластеры в Центральном, Кировском, Советском и Октябрьском округах исследуемого региона. В контексте размещения зарядной инфраструктуры данные результаты дают понимание областей с наиболее высоким спросом на зарядную инфраструктуру для электромобилей. Предполагается использовать полученные результаты в дальнейших исследованиях при разработке имитационной модели функционирования таксопарка на электромобилях, которая позволит оценить нагрузку на зарядную инфраструктуру в зависимости от особенностей транспортных потоков.

Подводя итог изложенному выше, необходимо отметить, что проведенный анализ пространственно-временных характеристик движения автомобилей в контексте поездок такси с использованием метода кластеризации DBSCAN показал значимые результаты для решения задачи размещения зарядной инфраструктуры для электромобилей. На текущем этапе исследования проведенный анализ позволил решить задачу по объединению начальных и конечных пунктов отправления такси в исследуемом регионе в обоснованные кластеры.

В качестве дальнейших перспектив исследования предполагается разработать расчет необходимого количества зарядных станций в каждом кластере и провести апробацию данного расчета с использованием такого инструмента, как имитационное моделирование.

Список литературы

1. Трофименко, Ю. В. Перспективные направления повышения экологичности транспортных объектов и технологий / Ю. В. Трофименко. – Текст : непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы международной научно-практической конференции, Орел, 20 мая 2020 г. / под общей ред. А. Н. Новикова / Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева. – Орел, 2020. – С. 127–133. – EDN RPCDYT.

2. Meszaros, F., Shatanawi, M., & Ogunkunbi, G. A. (2021). Challenges of the electric vehicle markets in emerging economies. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(1), 93-101. DOI 10.3311/PPtr.14037.

3. Yang, X., Yun, J., Zhou, S., Lie, T. T., Han, J., Xu, X., ... & Ge, Z. (2025). A spatiotemporal distribution prediction model for electric vehicles charging load in transportation power coupled network. *Scientific Reports*, 15(1), 4022. DOI 10.1038/s41598-025-88607-y.
4. Zamprogno, M. M., & Esztergár-Kiss, D. (2024). Applying Cluster Analysis for the Investigation of Travel Behavior and User Profiles. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 52(4), 362-371. DOI 10.3311/PPtr.25663.
5. Wang, W., & Liu, C. (2025). An Integrated Algorithm for Short Term Charging Load Prediction of Electric Vehicles Based on a More Complete Feature Set. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(1), 47-59. DOI 10.1007/s42835-024-01979-5.
6. Chen, C., Li, T., Wang, S., Hua, Z., Kang, Z., Li, D., & Guo, W. (2021, December). Location Analysis of Urban Electric Vehicle Charging Metro-Stations Based on Clustering and Queuing Theory Model. In *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications* (pp. 282-292). Singapore: Springer Singapore. DOI 10.1007/978-981-19-1253-5_21.
7. Vansola, Binal & Chandra, Minal & Shukla, Rena. (2022). GIS-Based Model for Optimum Location of Electric Vehicle Charging Stations. 10.1007/978-981-19-2273-2_8.
8. Каталевский, Д. Ю. Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона / Д. Ю. Каталевский, Т. Р. Гареев. – Текст : непосредственный // Балтийский регион. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 118–139. – DOI 10.5922/2079-8555-2020-2-8. – EDN DXLAXX.
9. Мишкина, А. А. Решение задачи размещения-распределения зарядных станций для электромобилей на картах с помощью машинного обучения / А. А. Мишкина, И. И. Егоров, А. Г. Анюхин. – Текст : непосредственный // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12. – № 3. – С. 114–121. – EDN BLNHUS.
10. Яковлева, Ю. С. Распределение зарядной инфраструктуры в зависимости от экологических показателей различных районов города Москвы / Ю. С. Яковлева, Н. В. Поживилов. – Текст : непосредственный // Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения : сборник трудов всероссийской (национальной) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов, Челябинск, 24 января 2023 г. / науч. редактор А. Н. Ткачёв / Южно-Уральский технологический университет. – Челябинск, 2023. – С. 237–242. – EDN JCHLBX.
11. Разработка модуля размещения зарядных станций для электротранспорта на основе использования геоинформационных систем / П. Ю. Бучацкий, С. В. Теплоухов, С. В. Онищенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2023. – № 3 (326). – С. 81–88. – DOI 10.53598/2410-3225-2023-3-326-81-88. – EDN GWTXEC.
12. Richard, R., Cao, H., & Wachowicz, M. (2021, April). A spatial-temporal comparison of ev charging station clusters leveraging multiple validity indices. In *International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems* (pp. 34-57). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-031-17098-0_3.
13. MacQueen, J. (1967, January). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics* (Vol. 5, pp. 281-298). University of California press.
14. Bishop, Christopher. (2006). Pattern Recognition and Machine Learning. 10.1117/1.2819119.15. Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996, August). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).
16. Ву, В. Т. Гибридный алгоритм кластеризации FastDBSCAN / В. Т. Ву, Д. В. Пантюхин, А. И. Галушкин. – Текст : непосредственный // Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). – Москва, 2015. – Т. 7. – № 3 (27). – С. 77–81. – EDN UNWYBT.

17. Geoff Boeing Urban planning and spatial analysis professor at USC // geoffboeing.com : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://geoffboeing.com/publications/osmnh-paper/> (дата обращения: 10.03.2025).

References

1. Trofimenko Yu.V. [Promising directions for improving the environmental friendliness of transport facilities and technologies]. *Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte: materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Information technologies and innovations in transport: materials of the VI International scientific and practical conference]. Orel, 2020, pp. 127-133. EDN RPCDYT. (In Russian).
2. Meszaros, F., Shatanawi, M., & Ogunkunbi, G. A. (2021). Challenges of the electric vehicle markets in emerging economies. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 49(1), 93-101. DOI 10.3311/PPtr.14037.
3. Yang, X., Yun, J., Zhou, S., Lie, T. T., Han, J., Xu, X., ... & Ge, Z. (2025). A spatiotemporal distribution prediction model for electric vehicles charging load in transportation power coupled network. *Scientific Reports*, 15(1), 4022. DOI 10.1038/s41598-025-88607-y.
4. Zamprogno, M. M., & Esztergár-Kiss, D. (2024). Applying Cluster Analysis for the Investigation of Travel Behavior and User Profiles. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 52(4), 362-371. DOI 10.3311/PPtr.25663.
5. Wang, W., & Liu, C. (2025). An Integrated Algorithm for Short Term Charging Load Prediction of Electric Vehicles Based on a More Complete Feature Set. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(1), 47-59. DOI 10.1007/s42835-024-01979-5.
6. Chen, C., Li, T., Wang, S., Hua, Z., Kang, Z., Li, D., & Guo, W. (2021, December). Location Analysis of Urban Electric Vehicle Charging Metro-Stations Based on Clustering and Queuing Theory Model. In *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications* (pp. 282-292). Singapore: Springer Singapore. DOI 10.1007/978-981-19-1253-5_21.
7. Vansola, B., Chandra, M., & Shukla, R. N. (2022). Gis-based model for optimum location of electric vehicle charging stations. In *Recent Advances in Transportation Systems Engineering and Management: Select Proceedings of CTSEM 2021* (pp. 113-126). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI 10.1007/978-981-19-2273-2_8.
8. Katalevsky Dmitry Yu., & Gareev Timur R. (2020). Development of electric road transport: simulation modelling. *Baltic Region*, 12 (2), 118-139. DOI 10.5922/2079-8555-2020-2-8. EDN QSERXO.
9. Mishkina A., Egorov I., Anyukhin A. Solving the location-allocation problem of charging stations for electric vehicles on maps using machine learning. *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 114-121. EDN BLNHUS. (In Russian).
10. Yakovleva Yu.S., Pozhivilov N.V. [Distribution of charging infrastructure depending on environmental indicators of various districts of Moscow]. *Sovremennaiia tekhnika i tekhnologii v elektroenergetike i na transporte: zadachi, problemy, resheniia : sbornik trudov VII vs Rossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii nauchnykh, nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov, aspirantov i studentov, Cheliabinsk, 24 ianvaria 2023 goda* [Modern equipment and technologies in the electric power industry and transport: tasks, problems, solutions : proceedings of the VII All-Russian (national) scientific and practical conference of scientific, scientific and pedagogical workers, graduate students and students, Chelyabinsk, January 24, 2023]. Chelyabinsk, 2023. pp. 237-242. EDN JCHLBX. (In Russian).
11. Buchatskiy P.Yu., Teploukhov S.V., Onishchenko S.V., Bychkov T.Yu., Mikhaltsov M.T., Lisova A.N., Makarenko O.I. The development of a geoinformation system-based module for the placement of charging stations in the context of electric transportation. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Adygea State University. Series: Natural-mathematical and technical sciences*, 2023, no. 3(326), pp. 81–88. DOI 10.53598/2410-3225-2023-3-326-81-88. EDN GWTXEC. (In Russian).

12. Richard, R., Cao, H., & Wachowicz, M. (2021, April). A spatial-temporal comparison of ev charging station clusters leveraging multiple validity indices. In *International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems* (pp. 34-57). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-031-17098-0 3.

13. MacQueen, J. (1967, January). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics* (Vol. 5, pp. 281-298). University of California press.

14. Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: springer.

15. Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996, August). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).

16. Vu Viet Thang, Pantiukhin D.V., Galushkin A.I. Hybrid clustering FastDBSCAN algorithm. *Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2015, vol. 7, no. 3(27), pp. 77-81. EDN UNWYBT. (In Russian).

17. Geoff Boeing Urban planning and spatial analysis professor at USC. Available at: <https://geoffboeing.com/publications/osmnx-paper/> (accessed 10.03.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: tskom@mail.ru

Заренкова Юлия Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (960) 986-29-94.

E-mail: zarenkovaiu@icloud.com

Голубков Антон Сергеевич

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 (904) 326-61-80.

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комяков, А. А. Применение анализа пространственно-временных паттернов движения такси с использованием алгоритмов кластеризации в проектировании сети зарядной инфраструктуры для электромобилей / А. А. Комяков, Ю. В. Заренкова, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2025. – № 1 (61). – С. 133 – 144.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Komyakov Alexander Anatolyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Sciences in Engineering, professor of the department "Theoretical Electrical Engineering", OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-13-44.

E-mail: tskom@mail.ru

Zarenkova Yulia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Postgraduate student of the department "Theoretical Electrical Engineering", OSTU.

Phone: +7 (960) 986-29-94.

E-mail: zarenkovaiu@icloud.com

Golubkov Anton Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph.D. in Engineering, associate professor of the department "Electric Power Supply of Railways", OSTU.

Phone: +7 (904) 326-61-80.

E-mail: anton.golubkov@gmail.com

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komyakov A.A., Zarenkova Yu.V., Golubkov A.S. Application of the analysis of spatiotemporal patterns of taxi movement using clustering algorithms in the design of the charging infrastructure network for electric vehicles. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2025, no. 1(61), pp. 133-144. (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»

В редакцию журнала представляются:

1. Текст статьи на бумаге формата А4.
 2. Текст статьи в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc или фамилия.docx.
 3. Экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати (по форме, принятой в организации авторов).
 4. Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат» (<https://www.antiplagiat.ru/>). Оригинальность должна составлять не менее 80 %.
 5. Гарантийное письмо о передаче авторского права с подписями всех соавторов статьи (образец прилагается).
 6. Согласие на обработку персональных данных от каждого автора (соавтора) статьи (образец прилагается).
- В тексте статьи обязательно указываются тематический раздел журнала, в который подается статья, и научная специальность, которой эта статья соответствует.

Текст статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию авторов (место работы или учебы), заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова на русском и английском языках, текст статьи, список литературы в русском и латинском алфавитах, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Текст статьи оформляется в соответствии с установленным образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы; текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть: оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); «англоязычной» (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы – формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей – 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста – Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (выполняются только в редакторе MathType): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт; начертание и размер символов в расшифровке формул по тексту должны в точности совпадать с начертанием и размером символов в самой формуле; при записи формул следует использовать значок градуса (°), а не цифру «ноль» (0); следует использовать знак умножения (×), а не букву «х»; в качестве знаков препинания между словами используются тире (–), а не дефисы (·);

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы, такие как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт; необходимо использовать французские кавычки («ёлочки»); межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см; автоматическую нумерацию необходимо полностью исключить; инициалы и фамилии всегда должны находиться на одной и той же строке; каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в отдельном (исходном) файле в редактируемом виде; рисунки и таблицы должны иметь только книжную ориентацию;

после текста статьи следует список использованной литературы на русском языке и в латинском алфавите; ссылки на литературу в тексте статьи указываются арабскими цифрами в квадратных скобках; список использованной литературы на русском языке имеет заголовок *Список литературы* и оформляется по требованиям ГОСТ Р 7.0.100–2018; список использованной литературы в латинском алфавите имеет заголовок *References* и оформляется в соответствии с установленным образцом; при публикации научной статьи на русском или английском языке обязательным является наличие ключевых слов и аннотации на русском и английском языках.

Материалы статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число авторов статьи не должно превышать трех человек, в ином случае необходимо отдельное согласование с редакцией. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц без учета аннотации и списка литературы. В ином случае вопрос по объему статьи также необходимо согласовывать с редакцией. Иллюстрации, схемы и таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации в разных выпусках журнала.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления считается день получения редакцией окончательного текста.

Принятые к публикации материалы статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные с нарушением указанных выше требований, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов статей, необходимо обращаться в редакцию журнала.

Научное издание

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

№ 1 (61) 2025

Научно-технический журнал «Известия Транссиба / Journal of Transsib Railway Studies» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором), регистрационный номер ПИ № ФС77-75780 от 23 мая 2019 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в интернет-каталоге «Пресса по подписке» (www.akc.ru) – 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 31.03.2025.

Формат 60 × 90/8.

Тираж 250 экз.

Дата выпуска: 04.04.2025.

