

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 22, выпуск 1, 2025

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

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

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский Центр РИОР» по договору
№ ЭА78751 от 28.12.2024

Адрес учредителя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32; e-mail: izvestia@pgups.ru

Адрес издателя

127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, офис 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005, выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень

ведущих рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015, № 6/6)

Журнал публикует научные статьи в области технических
наук (транспорт, телекоммуникации, строительство)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Урал-Пресс» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Валинский Олег Сергеевич, главный редактор,
канд. техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,
Россия

Канаев Андрей Константинович, заместитель главного
редактора, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Абу-Хасан Махмуд Самиевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Агеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Анисимов Владимир Александрович, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Атрошенко Светлана Алексеевна, д-р техн. наук,
профессор, ИПМаш РАН, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Багери Мортеза, профессор, Иранский университет науки
и технологии, Тегеран, Иран

Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Воробьев Александр Алфеевич, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Голоскоков Дмитрий Петрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ибатов Марат Кенесович, д-р техн. наук, профессор,
Карагандинский технический университет имени Абылкаса
Сагинова, Караганда, Казахстан

Кондратьева Лидия Никитовна, д-р техн. наук, профессор,
СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

Кручек Виктор Александрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Лукашевич Анатолий Анатольевич, д-р техн. наук,
профессор, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

Маилян Левон Рафаэлович, действительный член
Российской Академии архитектуры и строительных наук,
д-р техн. наук, профессор, ДГТУ, Ростов-на-Дону, Россия

Макарова Елена Игоревна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Матросов Александр Васильевич, д-р физ.-мат. наук,
профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

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

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Привалов Андрей Андреевич, д-р воен. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Рахимов Рустам Вячеславович, д-р техн. наук, доц.,
Ташкентский государственный транспортный университет,
Ташкент, Республика Узбекистан

Скотникова Маргарита Александровна, д-р техн. наук,
профессор, СПбПУ, Высшая школа машиностроения,
Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Игоревич, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Соколов Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, профессор,
ТИУ, Тюмень, Россия

Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

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

Уздин Александр Моисеевич, д-р техн. наук, доц.,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Шевлюгин Максим Валерьевич, д-р техн. наук, доц.,
РУТ (МИИТ), Москва, Россия

Шершнева Мария Владимировна, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать с оригинал-макета 14.03.2025.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 34,12.

Тираж 200 экз. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «БУКИ ВЕДИ»,

г. Москва, Партийный пер., 1, корп. 58, стр. 3

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 22, issue 1, 2025

ISSN (Print) 1815-588X
ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company
"Publishing Center RIOR" under contract
N ЭА78751 dated December 28, 2024

Founder's address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32, e-mail: izvestia@pgups.ru

Publisher's address

127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402

Mass media registration certificate number

ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005
issued by the Federal service for the monitoring
of legislation compliance in the sphere of mass
communications and the preservation of cultural heritage,
North West Federal district division

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

The journal is included in the List of leading
peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields
of Technics (transport, telecommunications, construction)

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33315

JOURNAL STAFF

Oleg Valinskiy, Editor-in-chief, PhD Eng. Sci.,
Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, Deputy Editor-in-chief, D. Eng. Sci.,
Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University, St. Petersburg, Russia

Andrey Evstafev, Science editor, D. Eng. Sci., Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

EDITORIAL TEAM

Makhmud Abu-Khasan, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Sergey Ageev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Anisimov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Svetlana Atroshenko, D. Eng. Sci., Professor, RAS Institute for
Applied Mechanics, St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Morteza Bagheri, PhD, Associate Professor, Iran University of
Science and Technology, Teheran, Iran

Yuriy Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Lyudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Vorobyev, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Dmitriy Goloskokov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Marat Ibatov, D. Eng. Sci., Professor, Karaganda Technical
University, Karaganda, Kazakhstan

Lidia Kondratyeva, D. Eng. Sci., Professor, Saint Petersburg State
University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg,
Russia

Viktor Kruchek, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

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

Anatoly Lukashevich, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil
Engineering, St. Petersburg, Russia

Levon Mailyan, full member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, D. Eng. Sci., Professor,
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Elena Makarova, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Alexander Matrosov, D. Phys.-Math. Sci., Professor, St. Petersburg
University, St. Petersburg, Russia

Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Andrey Privalov, D. Mil. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Rustam Rakhimov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent
State Transport University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Margarita Skotnikova, D. Eng. Sci., Professor, Higher School
of Mechanical Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Vladimir I. Smirnov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor
Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg,
Russia

Vladimir N. Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Sokolov, D. Eng. Sci., Professor, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russia

Valentina Soloveva, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Alexander Uzdin, D. Eng. Sci., Associate Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Maksim Shevlyugin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian
University of Transport, Moscow, Russia

Maria Shershneva, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

© Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда	7
С. С. Смирнов, В. В. Костенко Применение корреляционного анализа при определении факторов влияния на месячные объемы перевозок в пригородном сообщении	19
О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения	32
Л. А. Лосин, Н. А. Калюжный Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта	47
Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка	60
С. Г. Истомина, К. И. Доманов, А. П. Шатохин, И. Н. Денисов, А. А. Лаврухин Использование методов машинного обучения для решения задачи энергооптимального движения поезда	75
Н. С. Бушуев, М. С. Храбрая О перспективах сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Минск	85
А. А. Будаев, Е. А. Третьяков Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник»	92
Я. В. Популов, А. А. Комяков Анализ влияния эксплуатационных факторов на энергетическую эффективность электромобилей, используемых в производственной деятельности ОАО «РЖД»	102
А. Н. Савоськин, А. А. Чучин, А. Н. Калякулин Анализ изменения нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями	112
А. А. Воробьев, Н. В. Богданов Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава	121
В. Н. Кавказский Анализ мировых тенденций развития интермодальных пересадочных узлов на базе международных аэропортов	134

С. Н. Журавлев, Т. С. Авсиевич, В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин О возможности применения алгоритмов программного комплекса «Тяга – Прогноз» при разработке энергооптимальных режимов ведения поездов	148
Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин О компенсации помехи, возникающей из-за асимметрии в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене	160
Л. В. Мартыненко, Д. П. Кононов, С. В. Кротов Стратегия развития интенсивности износа системы «колесо – рельс» с увеличенной осевой нагрузкой и особенностью конструкции экипажной части.....	171

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. Блюдов, Е. А. Волков, Ю. В. Иванов, Г. Ю. Пронин Ускорение вычисления CRC в устройствах на базе программируемых логических интегральных схем	179
Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров Снижение рисков травмирования при использовании электросамокатов.....	186
У. З. Шермухамедов, А. А. Белый, М. М. Собирова, Ш. Ш. Кадирова Алгоритм математической модели для оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений.....	196
К. В. Талантова Строительные конструкции с применением композиционных материалов на основе бетона	206
В. Н. Кавказский, Д. А. Соловьев, Р. А. Соловьев Опыт обследования и проведения инженерных расчетов тоннеля Сухарный Лозово-Севастопольской ж. д.	215
В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко Об особенностях гидравлического расчета фильтрующих насыпей в связных грунтах.	228
А. В. Бенин, О. Ю. Беляев, Е. Р. Богданова, Р. Крист, Ю. Ю. Курятников Экспериментально-аналитическая оценка возможности применения композитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сплошного сечения.....	238
Т. Аввад, А. А. Петренко Устойчивое строительство: международные практики и рекомендации для интеграции в казахстанские проекты	252

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина Моделирование действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени.....	263
--	-----

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin, E. V. Sukhanov Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains	16
S. S. Smirnov, V. V. Kostenko The Use of Correlation Analysis for Determining Factors Influencing Monthly Commuter Traffic Volumes	30
O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, N. M. Luganchenko Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods	45
L. A. Losin, N. A. Kalyuzhny Identifying Polycentric Urban Area Potential Based on Mathematical Modelling of Passenger Public Transport Systems	56
E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva Mathematical Model of the Railway Operation Optimization to Increase a Railway Section Capacity	71
S. G. Istomin, K. I. Domanov, A. P. Shatokhin, I. N. Denisov, A. A. Lavrukhin The Use of Machine Learning Methods to Solve the Problem of Energy-Efficient Train Movement.....	83
N. S. Bushuev, M. S. Khrabraya The Construction of Moscow – Minsk High-Speed Railway and Its Prospects.....	89
A. A. Budaev, E. A. Tretyakov A “Digital Twin”-Based Simulation Model for an Electric Locomotive Electrical Equipment.....	100
Ya. V. Populov, A. A. Komyakov Analysis of Maintenance Factors Affecting the Energy Efficiency of Electric Vehicles Used in the JSC “Russian Railways” Production Activities	110
A. N. Savoskin, A. A. Chuchin, A. N. Kalyakulin Analysis of the Load Transmission from the Locomotive Two-Axle Bogie Wheels to the Rails at the Torque Development in a Traction Motor	119
A. A. Vorobev, N. V. Bogdanov Modelling the “Piston Effect” Caused by a Train Running in the Tunnel	132
V. N. Kavkazskiy Analysis of Global Trends in the Development of Intermodal Transfer Hubs Based on International Airports.....	146

S. N. Zhuravlev, T. S. Avsievich, V. P. Grinevich, D. N. Kurilkin

Using Algorithms of the Traction-Forecast Software Package to Develop Energy-Efficient Train Driving Modes 158

R. O. Ryadchikov, V. S. Kuzmin

Compensation of Electromagnetic Interference Arising Due to Inductive Coupling Asymmetry of the Metro Locomotive Signalling with Automatic Speed Control..... 169

L. V. Martynenko, D. P. Kononov, S. V. Krotov

Strategy for the Wheel-Rail Wear Rate Development with Increased Axial Load and a Car Underframe Specific Design 177

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. A. Blyudov, E. A. Volkov, Yu. V. Ivanov, G. Yu. Pronin

Acceleration of Software CRC Calculation Based on Programmable Logic Integrated Circuits 184

Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov

Reducing the Risk of Injury from Electric Scooters 194

U. Z. Shermukhamedov, A. A. Belyi, M. M. Sobirova, Sh. Sh. Kadirova

Mathematical Model and Algorithm for Assessing and Predicting the Technical Condition of Reinforced Concrete Bridge Structures 204

K. V. Talantova

Use of Concrete-Based Composite Materials in Construction 212

V. N. Kavkazsky, D. A. Soloviev, R. A. Soloviev

Engineering Survey and Calculations of the Sukharny Tunnel on Lozovo-Sevastopol Railway 226

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev, Yu. G. Yanko

Specifics of Rockfill Dam Hydraulic Calculations in Clay Soils..... 236

A. V. Benin, O. Yu. Beliaev, E. R. Bogdanova, R. Christ, Yu. Yu. Kuryatnikov

Experimental and Analytical Assessment of Use of Composite Rebars for Reinforcing Driven Piles with Solid Square Cross-Section 250

T. Awwad, A. A. Petrenko

Sustainable Construction: International Practices and Recommendations for Integration into Kazakhstan Projects..... 261

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina

Modelling Attacker Network Reconnaissance Using the Environment of an Integrated Time Scale Synchronization and Delivery System 272



УДК 629.4.086

Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда

О. С. Валинский, А. Н. Марикин, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов

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

Для цитирования: Валинский О. С., Марикин А. Н., Калинин Н. П., Суханов Е. В. Внедрение системы автоведения для повышения точности управления и энергоэффективности высокоскоростного электропоезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 7–18. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-7-18

Аннотация

Цель: Разработка и исследование алгоритма системы автоведения для высокоскоростных поездов с учетом требований энергоэффективности, точности соблюдения графика движения, повышения безопасности и комфорта пассажиров. **Методы:** Применен аналитический и программно-расчетный подходы к проектированию алгоритма автоведения. Для моделирования движения электропоезда использован метод конечных элементов. Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотек NumPy, Pandas и Matplotlib. Проанализированы данные движения высокоскоростного поезда «Сапсан», проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных. **Результаты:** Разработан алгоритм системы автоведения, позволяющий повысить энергоэффективность и точность соблюдения графика движения, а также снизить субъективное влияние машинистов на энергозатраты. Зафиксирован эффект экономии электроэнергии на 11 % и более при различной интенсивности движения от внедрения системы. Представлены результаты моделирования кривой движения в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными. **Практическая значимость:** Внедрение предложенного алгоритма автоведения позволит повысить энергоэффективность работы высокоскоростных поездов, улучшить эксплуатационные характеристики, увеличить точность соблюдения графиков движения и повысить уровень комфорта пассажиров. Разработанная система может быть применена на магистралях с высокой интенсивностью движения для повышения пропускной способности без модернизации инфраструктуры.

Ключевые слова: высокоскоростной поезд, система автоведения, энергоэффективность, автоматизированное управление, алгоритм автоведения, оптимизация движения, железнодорожный транспорт.

Введение

Развитие высокоскоростных железных дорог меняет устоявшийся уклад в пассажирском транспортном секторе. Ключевые факторы, такие как комфорт, доступность, уровень обслуживания и сокращение времени в пути, становятся опреде-

ляющими при выборе транспорта пассажирами, что в случае с высокоскоростной железной дорогой дает преимущество относительно авиаперевозок на небольших расстояниях [1].

Однако рост пассажиропотока на данный вид транспорта ставит перед отраслью новые

вызовы. Для удовлетворения спроса необходимо увеличивать количество выполняемых рейсов на линии движения, что, в свою очередь, повышает нагрузку на железнодорожную инфраструктуру. Высокая интенсивность движения поездов требует более эффективного управления движением для обеспечения безопасности и максимальной пропускной способности железной дороги. Интенсивный график движения поездов без предварительного расчета модели движения неизбежно приводит к нерациональному расходу электроэнергии [2], но даже с учетом детальных расчетов невозможно точно спрогнозировать влияние всех динамических факторов, действующих на движение высокоскоростного поезда в реальных условиях, что существенно затрудняет оптимизацию энергопотребления. Необходимо применение адаптивных систем управления, способных в режиме реального времени оперативно реагировать на изменения условий эксплуатации и выбирать оптимальный режим ведения поезда.

Системы автоматизированного управления предлагают решение данных задач. Автоведение позволяет выбрать рациональный режим движения поезда, повышая точность соблюдения расписания и снижая энергопотребление без ущерба для безопасности и комфорта пассажиров [3]. В результате железнодорожная инфраструктура высокоскоростного транспорта становится более эффективной, способной удовлетворить растущий спрос пассажиров. Это, в свою очередь, делает железнодорожный транспорт еще более привлекательным для пассажиров и позволяет ему удерживать конкурентные позиции на рынке.

Несмотря на активное развитие систем автоведения, они все еще имеют ряд недостатков, ограничивающих их эффективность. Одной из ключевых проблем является недостаточная адаптивность к изменяющимся условиям. Кроме того, многие системы требуют мощного технического оборудования из-за неоптимизированного алго-

ритма работы, что может приводить к задержке в обработке и ошибкам в управлении. Проблемы также возникают с точностью моделирования, а это напрямую влияет на качество управления. Неоптимальные алгоритмы прогнозирования и слабая способность к самокоррекции снижают энергоэффективность, а отсутствие стабильного результата работы автоведения делает системы невостребованными у машинистов. Все это указывает на необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов автоматизированного управления, способных гибко адаптироваться к реальным условиям эксплуатации [4].

Преимущества систем автоведения

В современной практике железнодорожных перевозок для обеспечения безопасности, соблюдения расписания и повышения энергоэффективности движения поездов применяются два основных метода управления: режимные карты и применение систем автоведения.

Использование режимных карт — это традиционный метод, основанный на предварительных расчетах на стационарном компьютере оптимальных режимов движения для всего профиля пути. Полученные данные заносятся в режимную карту, которая служит для машиниста своеобразной инструкцией по ведению поезда. Статический характер режимных карт не позволяет эффективно учитывать динамику реальных условий движения, что приводит к существенным расхождениям между расчетными и фактическими показателями. Для повышения точности прогнозирования требуется более гибкий подход, учитывающий изменения профиля пути, погодных условий и других факторов, влияющих на движение поезда.

Современные системы автоведения представляют собой комплексы программного обеспечения и бортового оборудования, обеспечивающие автоматизированное управление движением поезда в соответствии с заданным графиком

движения и с учетом текущих условий эксплуатации и обстановки. Встроенные алгоритмы оптимизации позволяют выбирать наиболее энергоэффективный режим движения в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям. Системы автоведения используют датчики, с которых непрерывно считывают информацию о состоянии поезда, пути и окружающей среде. На основе этих данных система принимает решения о скорости движения, тяге двигателей и других параметрах, обеспечивая соблюдение графика и оптимальное использование электроэнергии [5].

Преимущества систем автоведения:

- Повышение безопасности. Автоматизированное управление снижает вероятность ошибок машиниста и повышает безопасность движения.

- Высокая точность. Благодаря непрерывной адаптации к изменяющимся условиям системы автоведения обеспечивают более точное соблюдение графика движения и более эффективное использование энергии по сравнению с традиционными методами.

- Снижение нагрузки на машиниста. Автоматизация рутинных операций позволяет машинисту сосредоточиться на контроле над системой и принятии решений в нестандартных ситуациях.

- Экологичность. Экономия электроэнергии способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Можно выделить следующие уровни автоматизации управления поездом:

- Сочетание ручного управления и автоматического контроля. Машинист осуществляет непосредственное управление поездом, в то время как система непрерывно отслеживает его действия и в случае отклонения от допустимых параметров автоматически вмешивается в процесс управления, предотвращая возникновение аварийных ситуаций.

- Полуавтоматическое управление. Подразумевает разделение функций между машинистом и автоматическими системами: машинист при-

нимает стратегические решения и осуществляет общий контроль над движением, в то время как автоматические системы выполняют рутинные операции, такие как поддержание скорости, торможение и следование по заданному маршруту.

- Автоматизированное управление с функцией ручного вмешательства. В обычной эксплуатации поезд управляется системой автоведения и машинист выступает в роли наблюдателя, готового вмешаться в процесс управления в случае непредвиденных обстоятельств или неисправностей системы.

- Автоматическое управление. Все функции управления, включая контроль скорости, соблюдение маршрута и экстренное торможение, возложены на бортовые компьютеры и датчики, а машинист отсутствует в кабине. Оператор, который может вмешаться в управление поездом, находится в специализированном центре и отслеживает движение поезда [6].

Отсутствие системы контроля энергоэффективности движения подвижного состава приводит к отклонениям от оптимальных режимов ведения, что выражается в субъективном выборе машинистами режимов движения и отсутствии четкого планирования энергопотребления. Для визуализации различий в кривых движения разных рейсов на рис. 1 представлено семейство расшифрованных данных параметров движения высокоскоростного поезда для участка между двумя остановками.

Результаты предварительных исследований показывают, что внедрение систем автоведения позволит не только сократить энергопотребление и повысить точность соблюдения графика, но и улучшить условия труда персонала, а также повысить пропускную способность линий без необходимости масштабной модернизации инфраструктуры [7].

Таким образом, системы автоведения являются перспективным направлением развития железнодорожного транспорта, позволяющим повысить его эффективность и безопасность.

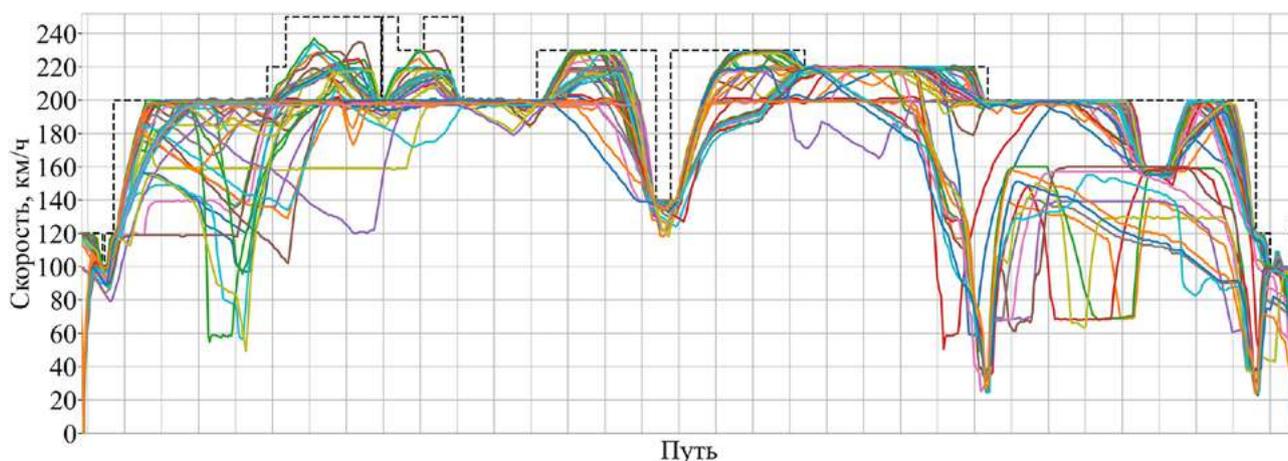


Рис. 1. Семейство расшифрованных данных параметров движения высокоскоростного поезда для участка между двумя остановками

Требования к системам автоведения высокоскоростного движения

Для успешной эксплуатации системы автоведения высокоскоростного поезда необходимо разработать определенные требования к программе на этапе разработки, которые будут определять основную логику работы алгоритма [8].

В общем виде алгоритмы систем управления автоведением можно классифицировать на два типа: системы, основанные на моделировании движения электропоезда (предиктивные), и системы, функционирующие без моделирования (реактивные).

В первом случае система принимает решения исключительно на основе текущих данных (скорости, положения поезда, сигналов с инфраструктуры и прочих) и не моделирует будущее движение поезда. Любые изменения в движении производятся в ответ на поступающие сигналы без расчета долгосрочных последствий. Такой подход в разработке автоведения идеально подходит для следования на линии согласно режимным картам, в которых будут четко указаны инструкции для выполнения определенной логики движения. Реактивные системы обладают рядом

серьезных ограничений, особенно для высокоскоростных поездов:

- Низкий уровень безопасности при торможении. Без прогнозирования длины тормозного пути, который значительно увеличивается для высокоскоростных поездов, система может не успеть вовремя снизить скорость движения, что повышает риск возникновения аварийных ситуаций. Это обусловлено тем, что необходимое время для замедления поезда может превышать доступное, оставшееся до прохождения критической точки.

- Низкий уровень безопасности при сложных скоростных ограничениях. В условиях эксплуатации высокоскоростных поездов на участках с переменным скоростным режимом системы управления, функционирующие без прогнозирования, обеспечивают недостаточную точность соблюдения установленных скоростных ограничений. Это обусловлено тем, что такие системы не способны учитывать динамику изменения скоростного режима на последующих участках пути.

- Погрешности в точности движения. В случае отклонения от графика движения система управления не будет корректировать скорость и продолжит выполнение заданного алгоритма.

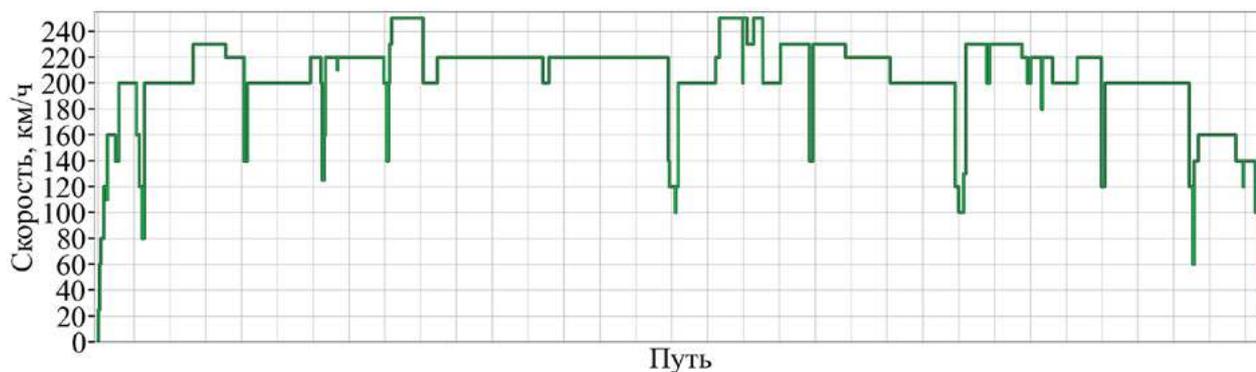


Рис. 2. Пример действующих ограничений скорости на участке движения

– Низкая энергоэффективность. Реактивные системы не учитывают характеристики профиля пути и не могут подобрать режимы движения, минимизирующие расход энергии.

– Низкий уровень комфорта. Динамика движения высокоскоростных поездов характеризуется постоянным изменением ускорения, обусловленным профилем пути и установленным графиком движения. Реактивные системы не могут обеспечить плавность изменения скорости, что приводит к резким перепадам ускорения.

Применение предиктивной системы управления позволяет устранить вышеуказанные недостатки за счет моделирования движения для всего профиля пути. Данная система выполняет комплексный расчет модели движения для определения параметров поезда в каждой точке пути и, таким образом, способна рассчитать управляющие воздействия для достижения целевых параметров движения в заданной координате с учетом всех эксплуатационных условий.

Несмотря на преимущества предиктивных систем, использование реактивного управления может быть оправдано в определенных ситуациях, таких как возникновение непредвиденных обстоятельств, требующих экстренного реагирования.

Помимо глобальной логики работы необходимо выделить следующие ключевые требования для алгоритма автоведения, учитывающие особенности эксплуатации высокоскоростных поездов:

1. Соблюдение временных и постоянных ограничений скорости профиля пути, обусловленных инфраструктурными ограничениями или требованиями безопасности. На данных участках движение поезда должно осуществляться со скоростью, не превышающей установленный предел. Пример ограничений скорости представлен на рис. 2.

2. Минимальные временные погрешности при движении по участкам пути согласно установленному графику. Любые отклонения во времени прибытия в контрольные точки должны быть в пределах допустимых погрешностей, а в идеале стремиться к нулю.

3. Обеспечение плавности изменения скорости и режимов движения. При моделировании движения электропоезда можно заранее установить в системе плавное изменение ускорения для повышения комфорта пассажиров во время движения.

4. Реализация прицельного рекуперативного торможения [9]. Система должна самостоятельно определять участки пути, для которых необходимо выполнить снижение скорости, согласно ограничениям скорости и заданным остановочным пунктам, и выполнять построение плавного торможения с помощью рекуперативного тормоза для повышения энергоэффективности движения. В ситуациях с тяжелым профилем допускается дополнительное включение реостатного и пневматического торможения, если это не идет в разрез с требованиями безопасности.

5. Динамический расчет оптимального выбора комбинации режимов движения для снижения энергозатрат и повышения энергоэффективности движения при соблюдении установленного графика. Предварительный расчет времени прибытия предоставляет системе возможность гибкого управления режимами ведения поезда. При наличии временного резерва автоведение может рационально корректировать скорость движения, выбирая оптимальную комбинацию режимов ведения с учетом скоростных ограничений и профиля пути.

6. Перерасчет оптимальной траектории движения в режиме реального времени. Алгоритм автоведения должен иметь возможность производить бесконечные итерационные вычисления модели движения для постоянной адаптации к текущим условиям эксплуатации.

7. Быстродействие программы для минимальной задержки в обработке данных и принятии решений в условиях высоких скоростей движения.

Скорость работы программы автоведения зависит от характеристики установленного программного обеспечения и технического оборудования. По уровню нагрузки на вычислительную систему алгоритм можно классифицировать следующим образом:

1. Системы с постоянным пересчетом модели движения. Такие системы часто называют адаптивными системами управления в реальном времени (Real-Time Adaptive Control). Они работают по принципу мгновенного реагирования на изменения и непрерывно обновляют оптимальный режим движения в каждый момент времени на основе поступающих данных. Данный подход основан на применении высокопроизводительных вычислительных ресурсов, так как требуется постоянный перерасчет сложных моделей.

Из преимуществ можно выделить максимальную точность и быстроту реакции. Хорошо подходят для сценариев с высокой динамичностью,

например при изменениях сигналов или аварийных ситуациях. К недостаткам можно отнести высокие требования к вычислительной мощности, но главной проблемой является подверженность нестабильности из-за постоянного обновления данных — система совершает резкие корректирующие действия, пытаясь адаптироваться к каждому незначительному изменению [10].

2. Системы с периодической проверкой отклонений. Обычно их называют системами дискретного адаптивного управления (Discrete Adaptive Control) или системами управления на основе событий. Эти системы работают по принципу периодического мониторинга и коррекции. Программа проверяет параметры движения с заданным интервалом времени или при наступлении определенного события, например резкого изменения скорости. Если выявляется отклонение от заранее рассчитанных зависимостей, запускается процесс пересчета. В остальное время поезд движется согласно модели.

К преимуществам данной системы можно отнести снижение нагрузки на вычислительную систему и более стабильную работу за счет сглаживания мелких изменений. Недостатком является небольшая временная задержка в реакции. Величина задержки для проверки устанавливается вручную, что позволяет найти компромисс между двумя подходами [11].

На практике чаще всего применяются гибридные системы, которые сочетают оба подхода: система работает по принципу периодического пересчета маршрута, например каждые 5 секунд, а в критических ситуациях, в частности при резком торможении, она переходит в режим постоянного пересчета. Этот подход позволяет обеспечить баланс между высокой точностью, стабильностью и скоростью реакции, не перегружая вычислительную инфраструктуру.

Выше в статье были определены основные требования, которые должны быть удовлетво-

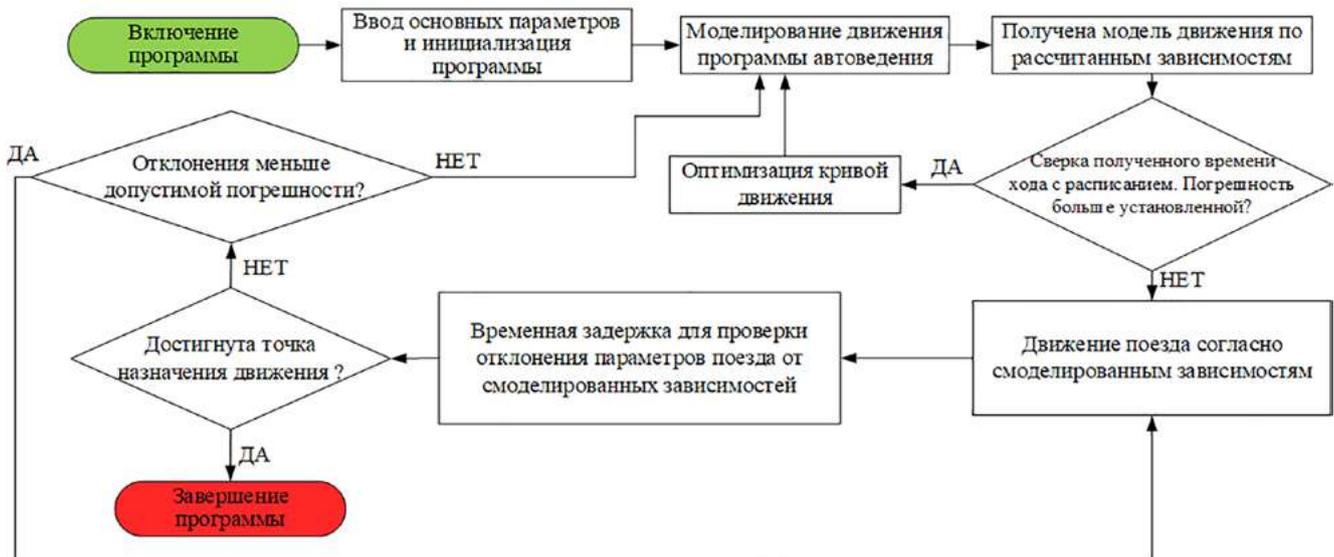


Рис. 3. Упрощенная блок-схема работы алгоритма

рены для эффективной работы системы автоведения. Теперь рассмотрим один из возможных подходов к реализации внутренней логики работы алгоритма, основанной на принципе метода конечных элементов [12]. Суть заключается в дискретном представлении движения электропоезда в виде совокупности фрагментов профиля пути, для каждого из которых рассчитывается модель движения с учетом его характеристик (длина, уклон) и действующих скоростных ограничений. Интеграция результатов по участкам формирует полную модель движения. Данный подход позволяет учесть все особенности профиля пути при расчете движения. Для определения оптимального режима ведения с учетом установленного времени хода программа должна изначально провести расчет с максимальным тяговым усилием, а далее оптимизировать модель движения согласно установленному временному профициту.

После составления требований к работе программы в рамках научного исследования был разработан полноценный алгоритм автоведения [13, 14], написанный на языке Python с подключением дополнительных библиотек: NumPy, Pandas, Matplotlib [15, 16]. Общую работу предложенного

алгоритма автоведения можно представить в виде упрощенной блок-схемы, изображенной на рис. 3.

Для инициализации программы необходим следующий набор входных данных: попутный продольный профиль пути, установленные ограничения скорости, технические характеристики электропоезда (масса, тягово-энергетические характеристики, основное сопротивление движению и др.), а также расписание движения. После введения исходных данных программа начинает производить итерационные вычисления по построению движения поезда в координатно-скоростной плоскости. В процессе движения программа сверяет текущие параметры поезда со смоделированными значениями для адаптации движения в случае отклонения. По достижении точки назначения программа должна завершить свою работу.

На выходе программы автоведения в каждый момент времени выдается «инструкция» для движения, представляющая собой вычисленные зависимости, которым высокоскоростной поезд должен следовать, чтобы прибыть точно по графику и проехать безопасно и энергоэффективно.

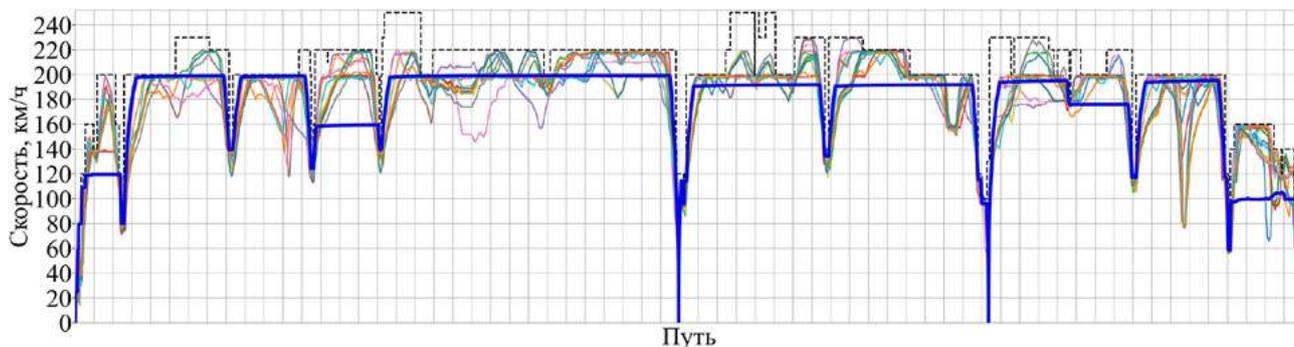


Рис. 4. Модель движения поезда в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными (синяя линия — модель автоведения, тонкие линии — семейство экспериментальных эксплуатационных данных)

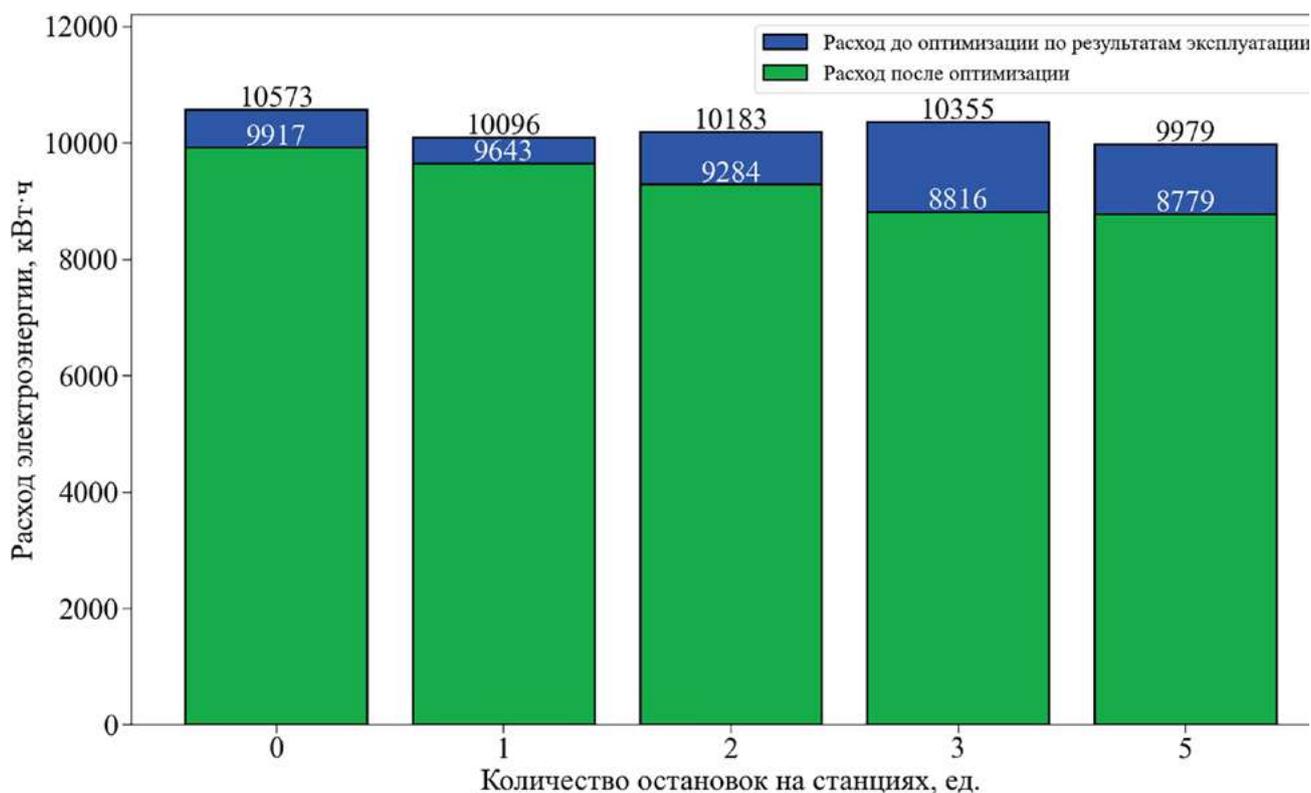


Рис. 5. Расчетный расход электроэнергии при применении алгоритма автоведения относительно фактического расхода

Пример модели движения предложенной программы автоведения в сравнении с экспериментальными эксплуатационными данными представлен на рис. 4.

После анализа результатов работы разработанного алгоритма автоведения и сравнения с экспериментальными данными рейсов за несколько

последних лет было установлено, что применение системы автоматизированного управления позволит оптимизировать выбор комбинации режимов движения высокоскоростного электропоезда, значительно снижая энергетические затраты. Проведенные программно-расчетные исследования фиксируют снижение фактического расхода

электроэнергии на 11 % и более при различной интенсивности движения.

Согласно собранной экспериментальной аналитике движения электропоезда «Сапсан» за период последних двух лет были рассчитаны средние значения расхода электроэнергии в зависимости от количества остановок. Полученные результаты фактического расхода и расчетного расхода на основе разработанного алгоритма в зависимости от количества остановок представлены на рис. 5.

Выводы

1. Применение системы автоведения обеспечивает снижение энергозатрат на 11 % и более при различной интенсивности движения.

2. Использование метода конечных элементов при проектировании алгоритма позволяет учитывать все особенности профиля пути и оперативно адаптировать режим движения.

3. Реализация алгоритма автоведения повышает точность соблюдения графика движения, что улучшает эксплуатационные характеристики высокоскоростных поездов. Предиктивное моделирование движения обеспечивает высокий уровень безопасности и комфорта пассажиров.

4. Применение гибридных систем управления, сочетающих постоянный и периодический переключения модели, позволяет достичь баланса между стабильностью работы, точностью расчетов и быстродействием системы.

5. Реализация алгоритма позволяет увеличить пропускную способность магистралей без дорогостоящей модернизации инфраструктуры, что особенно актуально при росте пассажиропотока.

6. В условиях интенсивного движения на высокоскоростных магистралях система автоведения может стать ключевым элементом повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта по сравнению с авиационными перевозками.

Список источников

1. Валинский О. С. Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта / О. С. Валинский, Н. П. Калинин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 4. — С. 7–14.

2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: справ.-метод. изд. / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. И. Иванов и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: Интехэнергоиздат, Теплоэнергетик, 2014. — 304 с.

3. ГОСТ Р 70059—2022. Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 150 с.

4. Авдиенко Е. Г. Обоснование функциональных возможностей системы автоведения электроподвижного состава при реализации беспилотных технологий на основе искусственного интеллекта / Е. Г. Авдиенко, Е. А. Третьяков // Молодая наука Сибири. — 2022. — № 2(16). — С. 55–62.

5. Баранов Л. А. Автоматическое управление движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 3(76). — С. 156–165.

6. Авдиенко Е. Г. Сравнительный анализ критериев оптимального движения электроподвижного состава с системой автоведения / Е. Г. Авдиенко, Е. А. Третьяков // Техника и технологии: пути инновационного развития: сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции, Курск, 30 июня 2022 года. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. — С. 24–27.

7. Зарифьян А. А. Оценка энергоэффективности электрической тяги методами компьютерного моделирования / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, В. В. Зак и др. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. — 2013. — № 1(65). — С. 24–37.

8. Разработка требований к программному обеспечению. 3-е изд., дополненное / Пер. с англ. — М.: Русская редакция; СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 736 с.
9. Плакс А. В. Анализ точности алгоритмов автоведения электропоездов: дисс. ... д-ратехн. наук / А. В. Плакс. — Л.: ЛИИЖТ, 1974.
10. Ие О. Н. Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования / О. Н. Ие // Актуальные вопросы современной экономики. — 2020. — № 5. — С. 428–439.
11. Ефремов А. Ю. ЕО-РТС: расширение функциональности системы управления движением поездов РТС / А. Ю. Ефремов // Железные дороги мира. — 2020. — № 3. — С. 61–65.
12. Каменев С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев. — Оренбург: ОГУ, 2019. — 110 с.
13. Свид. 2024688117 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управляющая программа для системы автоведения высокоскоростного электропоезда ЭВС 1 и оптимизации его основных параметров движения / О. С. Валинский, Н. П. Калинин, Е. В. Суханов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). — № 2024687168; заявл. 12.11.2024; опубл. 25.11.2024.
14. Свид. 2024687177 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управляющая программа для системы автоведения высокоскоростного электропоезда ЭВС 2 и оптимизации его основных параметров движения / О. С. Валинский, Н. П. Калинин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). — № 2024690814; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.12.2024.
15. Лутц М. Изучаем Python / М. Лутц; пер. с англ. А. Киселева. 4-е изд. — СПб.: Символ-Плюс, 2011. — 1280 с.
16. Вандер Плас Дж. Python для сложных задач. Наука о данных / Дж. Вандер Плас; пер. с англ. Л. Киселевой. — СПб.: Sprint Book, 2024. — 592 с.
- Дата поступления: 08.01.2025
Решение о публикации: 17.02.2025

Контактная информация:

ВАЛИНСКИЙ Олег Сергеевич — канд. техн. наук, проф.; rector@pgups.ru
МАРИКИН Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф.; marikin_s@mail.ru
КАЛИНИН Николай Павлович — аспирант, инженер; nikolaykalinin1997@gmail.com
СУХАНОВ Евгений Владимирович — аспирант; geneek123@gmail.com

Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains

O. S. Valinsky, A. N. Marikin, N. P. Kalinin, E. V. Sukhanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Valinsky O. S., Marikin A. N., Kalinin N. P., Sukhanov E. V. Implementation of an Automatic Control System to Improve the Operation Accuracy and Energy Efficiency on High-Speed Electric Trains // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 7–18. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-18

Summary

Purpose: To develop and evaluate an automatic train control algorithm for high-speed trains aiming at energy efficiency, timetable accuracy and increased passenger safety and comfort. **Methods:** An analytical

and computer-based approach was used to design an automatic control algorithm. The finite element method was used to simulate an electric train movement. The algorithm has been implemented in Python language using NumPy, Pandas and Matplotlib libraries. The Sapsan high-speed train operation data have been analysed and a comparative analysis of experimental and computational data has been carried out. **Results:** The automatic train control algorithm has been developed to improve energy efficiency and timetable accuracy, as well as to reduce the train driver impact on energy consumption. The effect of energy savings up to more than 11% in conditions of different traffic volumes due to the implementation of the system has been recorded. The results of the motion curve simulation compared with experimental operating data are presented. **Practical significance:** The implementation of the proposed automatic control algorithm will improve the energy efficiency of high-speed trains, enhance their operational characteristics, increase the train timetable accuracy and upgrade the level of passenger comfort. The developed system can be used on railways with high traffic intensity to increase railway capacity without upgrading the infrastructure.

Keywords: High-speed train, automatic control system, energy efficiency, automated control, automatic control algorithm, traffic optimization, railway transport.

References

1. Valinskiy O. S., Kalinin N. P. Otsenka energoeffektivnosti skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Energy efficiency assessment of high-speed and high-speed rail transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 4, pp. 7–14. (In Russian)
2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Ivanov B. I. et al. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: sprav.-metod. izd.; pod red. V. A. Gapanovicha* [Energy saving in rail transport: reference and method. ed.; edited by V. A. Gapanovich]. Moscow: Intekhenergoizdat, Teploenergetik Publ., 2014, 304 p. (In Russian)
3. GOST R 70059—2022. *Sistemy upravleniya i kontrolya zheleznodorozhnogo transporta dlya perevozok passazhirov v prigorodnom soobshchenii. Printsipy postroeniya i osnovnye funktsional'nye trebovaniya* [GOST R 70059—2022. Rail transport control and monitoring systems for suburban passenger transportation. Design principles and basic functional requirements]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2022, 150 p. (In Russian)
4. Avdienko E. G., Tret'yakov E. A. Obosnovanie funktsional'nykh vozmozhnostey sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava pri realizatsii bespilotnykh tekhnologiy na osnove iskusstvennogo intellekta [Justification of the functional capabilities of the automatic control system of electric rolling stock in the implementation of unmanned technologies based on artificial intelligence]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2022, Iss. 2(16), pp. 55–62. (In Russian)
5. Baranov L. A. Avtomaticheskoe upravlenie dvizheniem poezdov metropolitena [Automatic control of metro train traffic]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2018, vol. 16, Iss. 3(76), pp. 156–165. (In Russian)
6. Avdienko E. G., Tret'yakov E. A. Sravnitel'nyy analiz kriteriev optimal'nogo dvizheniya elektropodvizhnogo sostava s sistemoy avtovedeniya [Comparative analysis of the criteria for optimal movement of electric rolling stock with an automatic guidance system]. *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya: sbornik nauchnykh statey 11-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kursk, 30 iyunya 2022 goda* [Engineering and technology: ways of innovative development: collection of scientific articles of the 11th International scientific and practical conference, Kursk, June 30, 2022]. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet Publ., 2022, pp. 24–27. (In Russian)
7. Zarif'yan A. A., Grebennikov N. V., Zak V. V. et al. Otsenka energoeffektivnosti elektricheskoy tyagi metodami komp'yuternogo modelirovaniya [Assessment of the energy efficiency of electric traction by computer modeling methods]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostoeroeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute

of Electric Locomotive Building]. 2013, Iss. 1(65), pp. 24–37. (In Russian)

8. *Razrabotka trebovaniy k programmnomu obespecheniyu. 3-e izd., dopolnennoe. Per. s angl.* [Development of software requirements. 3rd ed., supplemented. Transl. from English]. Moscow: Russkaya redaktsiya Publ.; SPb.: BKhV-Peterburg Publ., 2014, 736 p. (In Russian)

9. Plaks A. V. *Analiz tochnosti algoritmov avtovedeniya elektropoezdov: diss. ... d-ratekhn. nauk* [Analysis of the accuracy of algorithms for automatic control of electric trains: diss. ... Dr. of Technical Sciences]. L.: LIIZhT Publ., 1974. (In Russian)

10. Ie O. N. *Imitatsionnoe modelirovanie transportnykh sistem: programmnye sredstva i napravleniya ikh sovershenstvovaniya* [Simulation modeling of transport systems: software tools and directions for their improvement]. *Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki* [Actual issues of modern economics]. 2020, Iss. 5, pp. 428–439. (In Russian)

11. Efremov A. Yu. *EO-PTC: rasshirenie funktsional'nosti sistemy upravleniya dvizheniem poezdov PTC* [EO-PTC: expanding the functionality of the PTC train control system]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2020, Iss. 3, pp. 61–65. (In Russian)

12. Kamenev S. V. *Osnovy metoda konechnykh elementov v inzhenernykh prilozheniyakh: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the Finite Element Method in Engineering Applications: a tutorial]. Orenburg: OGU Publ., 2019, 110 p. (In Russian)

13. Valinskiy O. S., Kalinin N. P., Sukhanov E. V. *Upravlyayushchaya programma dlya sistemy avtovedeniya vysokoskorostnogo elektropoezda EVS 1 i optimizatsii ego*

osnovnykh parametrov dvizheniya [Control program for the automatic control system of the high-speed electric train EVS 1 and optimization of its main driving parameters]. Svidetel'stvo RF, no. 2024688117, 2024. (In Russian)

14. Valinskiy O. S., Kalinin N. P. *Upravlyayushchaya programma dlya sistemy avtovedeniya vysokoskorostnogo elektropoezda EVS 2 i optimizatsii ego osnovnykh parametrov dvizheniya* [Control program for the automatic control system of the high-speed electric train EVS-2 and optimization of its main driving parameters]. Svidetel'stvo RF, no. 2024687177, 2024.

15. Lutts M. *Izuchaem Python; per. s angl. A. Kiseleva. 4-e izd.* [Learning Python; trans. from English by A. Kiseleva. 4th ed]. St. Petersburg: Simvol-Plyus Publ., 2011, 1280 p. (In Russian)

16. Vander Plas Dzh. *Python dlya slozhnykh zadach. Nauka o dannykh; per. s angl. L. Kiselevoy* [Python for Complex Problems. Data Science]. St. Petersburg: Sprint Book Publ., 2024, 592 p. (In Russian)

Received: January 08, 2025

Accepted: February 17, 2025

Author's information:

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

Alexander N. MARIKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; marikin_s@mail.ru

Nikolay P. KALININ — Postgraduate Student, Engineer; nikolaykalinin1997@gmail.com

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

УДК 656.072

Применение корреляционного анализа при определении факторов влияния на месячные объемы перевозок в пригородном сообщении

С. С. Смирнов, В. В. Костенко

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

Для цитирования: Смирнов С. С., Костенко В. В. Применение корреляционного анализа при определении факторов влияния на месячные объемы перевозок в пригородном сообщении // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 19–31. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-19-31

Аннотация

Цель: Организация пригородных железнодорожных перевозок требует учета сезонной неравномерности пассажиропотока. Ранее была обнаружена сильная корреляционная зависимость между величиной месячного пассажиропотока и среднемесячной температурой воздуха, но на некоторых направлениях связь значительно слабее, чем на других. Исследование выполнено с целью выявления причин слабой корреляционной связи на отдельных пригородных направлениях и уточнения области влияния погодных условий на месячные объемы перевозок. **Методы:** Исследования основаны на статистической отчетности субъектов пригородных перевозок: АО «Северо-Западная пригородная пассажирская компания» и ООО «Южная пригородная пассажирская компания». Месячные пассажиропотоки рассматривались в разрезе их возможности связи со среднемесячной температурой воздуха. Для обработки информации применены методы корреляционного анализа и средства MS Excel. Коэффициенты корреляции рассмотрены в комплексе с коэффициентами месячной неравномерности. **Результаты:** Установлена зависимость между силой корреляционной связи величины месячного пассажиропотока со среднемесячной температурой воздуха и диапазоном коэффициентов месячной неравномерности перевозок в течение года. Уточнена область применения корреляционной связи между среднемесячной температурой воздуха и месячной величиной пассажиропотока. Предложена классификация пригородных направлений в зависимости от фактора, оказывающего наибольшее влияние на объем перевозок. **Практическая значимость:** В целях прогнозирования описывать изменения пассажиропотоков правильнее меньшим числом факторов, так как ошибка прогноза будет меньшей. С этой целью направления классифицируются на «рабочие» и «рекреационные», так как для каждого из них следует выбирать разный набор факторов для составления прогнозных уравнений или моделей. Анализ корреляционной связи между среднемесячной температурой воздуха и месячной величиной пассажиропотока может быть полезен в случаях, где сложно определить тип направления исходя из географического расположения.

Ключевые слова: Неравномерность, пригородные перевозки, среднемесячная температура, маятниковая миграция, рекреационная зона, пассажиропоток, корреляционная зависимость.

Введение

Пригородные перевозки характеризуются сезонной неравномерностью [1, 2], но величина коэффициента неравномерности, определяемого как отношение месячного пассажиропотока к такой

же среднемесячной величине, для каждого направления разная и может сильно отличаться в одном железнодорожном узле.

В работе [3] выявлено, что на одном из направлений Московского железнодорожного узла име-

ется связь между месячной величиной пассажиропотока и среднемесячной температурой воздуха. В монографии [4] отмечено наличие такой связи и на направлениях Ленинградского железнодорожного узла. В статье [5] анализировались пассажиропотоки 2019 г. в Санкт-Петербургском железнодорожном узле, и наличие связи подтверждается, однако не на всех направлениях.

Для определения возможных причин слабой связи между месячной величиной пассажиропотока и среднемесячной температурой воздуха в данной статье проанализирована отчетность субъектов пригородных перевозок: АО «Северо-Западная пригородная пассажирская компания» и АО «Южная пригородная пассажирская компания». Анализ объемов пассажирских перевозок производился по шести направлениям Санкт-Петербургского железнодорожного узла с 2018 по 2023 г. и трем направлениям в пределах Крымского полуострова с 2021 по 2023 г.

Пассажиропотоки 2020 г. в работе не приняты к учету, так как их неравномерность обусловлена действием ограничений, введенных из-за пандемии COVID-19, что не является предметом исследования.

Неравномерность пассажиропотоков на исследуемых направлениях

Сезонная неравномерность определялась на следующих направлениях пригородного движения:

1. В пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области:
 - 1.1. Санкт-Петербург-Финляндский — Выборг.
 - 1.2. Санкт-Петербург-Финляндский — Приозерск.
 - 1.3. Санкт-Петербург-Финляндский — Мельничный Ручей.
 - 1.4. Санкт-Петербург-Финляндский — Белостров (через Сестрорецк).
 - 1.5. Санкт-Петербург-Витебский — Оредеж.
 - 1.6. Санкт-Петербург-Балтийский — Калище;

2. В пределах Крымского полуострова:

- 2.1. Симферополь-Пассажирский — Севастополь.
- 2.2. Симферополь-Пассажирский — Солёное Озеро.
- 2.3. Симферополь-Пассажирский — Евпатория-Курорт.

В табл. 1 приведены полученные значения коэффициентов неравномерности помесячно.

Направления Санкт-Петербургского железнодорожного узла подбирались так, чтобы их географическое расположение относительно рекреационных зон было отлично для каждого из направлений. В пределах Крымского полуострова направления подобраны исходя из величины пассажиропотока, а также из условия различного географического расположения относительно рекреационных зон.

Корреляция месячных пассажиропотоков со среднемесячной температурой воздуха

Для анализа пассажиропотоков среднемесячная температура воздуха принималась по фактическим данным для каждого месяца и года исследования в городах Санкт-Петербург, Саки, Симферополь и Севастополь.

Сила линейной связи между месячным пассажиропотоком и среднемесячной температурой воздуха характеризуется выборочным коэффициентом корреляции r . Чем ближе $|r|$ к 1, тем эта связь сильнее; чем ближе к 0, тем эта связь слабее. Значение r в данном случае определяется по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{cp})^2}}, \quad (1)$$

где t_i — среднемесячная температура в i -ом месяце;

t_{cp} — средняя величина среднемесячной температуры за период наблюдений;

Таблица. 1. Значения коэффициентов неравномерности на исследуемых направлениях

Направление*	Год	Месяцы											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Выборгское (1.1)	2018	0,68	0,66	0,72	0,80	1,23	1,27	1,44	1,38	1,19	1,04	0,82	0,78
	2019	0,69	0,66	0,74	0,83	1,12	1,38	1,38	1,38	1,15	1,01	0,85	0,81
	2021	0,63	0,62	0,76	0,85	1,09	1,45	1,49	1,31	1,14	1,07	0,81	0,79
	2022	0,66	0,57	0,77	0,82	1,11	1,38	1,48	1,47	1,07	1,06	0,84	0,76
	2023	0,67	0,66	0,74	0,85	1,12	1,32	1,40	1,45	1,25	0,97	0,82	0,75
Приозерское (1.2)	2018	0,66	0,67	0,70	0,77	1,21	1,29	1,50	1,41	1,22	1,04	0,78	0,75
	2019	0,70	0,71	0,74	0,82	1,16	1,46	1,39	1,34	1,16	0,98	0,78	0,76
	2021	0,62	0,65	0,76	0,84	1,06	1,50	1,61	1,27	1,13	1,02	0,76	0,80
	2022	0,66	0,61	0,77	0,81	1,10	1,40	1,50	1,47	1,09	1,02	0,81	0,76
	2023	0,67	0,67	0,75	0,82	1,13	1,34	1,38	1,41	1,24	0,98	0,81	0,79
Ириновское (1.3)	2018	0,82	0,87	0,93	1,01	1,16	1,02	0,96	0,98	1,04	1,17	1,04	1,02
	2019	0,82	0,91	0,98	1,05	1,06	1,08	1,00	0,97	1,02	1,12	0,98	0,99
	2021	0,68	0,80	0,97	1,06	1,02	1,18	1,02	1,00	1,07	1,14	0,97	1,10
	2022	0,77	0,76	1,01	1,04	1,07	1,14	1,01	1,00	1,07	1,11	1,02	1,00
	2023	0,76	0,78	0,98	1,05	1,10	1,08	1,00	1,01	1,07	1,11	1,05	1,02
Сестрорецкое (1.4)	2018	0,77	0,81	0,87	0,95	1,38	1,20	1,34	1,20	1,00	0,96	0,77	0,74
	2019	0,68	0,69	0,72	0,86	1,14	1,42	1,36	1,33	1,15	0,98	0,84	0,83
	2021	0,57	0,65	0,81	0,95	1,06	1,57	1,56	1,09	1,03	1,02	0,82	0,87
	2022	0,66	0,62	0,84	0,88	1,07	1,38	1,37	1,39	1,03	1,07	0,86	0,82
	2023	0,69	0,70	0,81	0,91	1,12	1,30	1,27	1,41	1,12	0,96	0,88	0,84
Витебское (1.5)	2018	0,78	0,82	0,87	0,93	1,18	1,11	1,08	1,06	1,10	1,20	0,94	0,94
	2019	0,77	0,79	0,88	0,96	1,08	1,16	1,09	1,04	1,09	1,15	1,00	1,00
	2021	0,67	0,76	0,93	1,00	1,05	1,16	1,07	1,04	1,13	1,17	0,93	1,09
	2022	0,75	0,70	0,95	0,97	1,05	1,13	1,06	1,05	1,13	1,23	1,01	0,97
	2023	0,78	0,79	0,93	0,95	1,09	1,12	1,08	1,07	1,12	1,09	1,02	0,96
Балтийское (1.6)	2018	0,76	0,80	0,88	0,94	1,12	1,04	1,02	1,02	1,10	1,24	1,05	1,02
	2019	0,76	0,82	0,92	0,98	1,06	1,09	1,01	1,00	1,10	1,16	1,04	1,04
	2021	0,64	0,76	0,95	1,04	1,04	1,16	1,06	1,03	1,14	1,15	0,96	1,06
	2022	0,72	0,69	0,95	1,01	1,06	1,14	1,08	1,08	1,11	1,13	1,02	1,00
	2023	0,76	0,77	0,93	0,94	1,05	1,09	1,06	1,07	1,16	1,12	1,05	1,00
Севастопольское (2.1)	2021	0,66	0,64	0,81	0,92	1,07	1,05	1,25	1,43	1,33	1,13	0,82	0,90
	2022	0,77	0,60	0,75	0,89	1,05	1,06	1,24	1,26	1,18	1,16	1,06	0,99
	2023	0,88	0,79	0,77	0,96	0,99	1,06	1,13	1,15	1,12	1,14	0,99	1,03
Джанкойское (2.2)	2021	0,77	0,82	0,99	1,04	1,08	1,09	1,06	1,12	1,11	1,05	0,88	0,98
	2022	0,79	0,74	0,88	0,94	1,00	1,06	1,10	1,12	1,12	1,13	1,07	1,05
	2023	0,84	0,81	1,00	0,96	1,03	1,05	0,99	1,05	1,09	1,13	1,01	1,04
Евпаторийское (2.3)	2021	0,41	0,43	0,56	0,63	0,87	1,26	2,22	2,45	1,30	0,76	0,56	0,55
	2022	0,55	0,43	0,58	0,73	0,87	1,28	2,08	2,00	1,15	0,87	0,78	0,67
	2023	0,61	0,55	0,72	0,71	0,82	1,24	1,75	1,88	1,28	0,95	0,77	0,70

*Нумерация направлений соответствует приведенному выше списку.

Таблица. 2. Значения коэффициентов корреляции

Направление	Год наблюдений				
	2023	2022	2021	2019	2018
	Коэффициенты корреляции				
Выборгское	0,97	0,97	0,97	0,94	0,95
Приозерское	0,96	0,97	0,94	0,94	0,95
Ириновское	0,54	0,54	0,57	0,65	0,38
Сестрорецкое	0,95	0,96	0,91	0,96	0,85
Витебское	0,75	0,57	0,75	0,43	0,62
Балтийское	0,69	0,69	0,66	0,67	0,56
Севастопольское	0,83	0,88	0,89	н/д*	н/д
Джанкойское	0,64	0,77	0,74	н/д	н/д
Евпаторийское	0,94	0,90	0,93	н/д	н/д

*Нет данных.

u_i — количество отправленных (прибывших) пассажиров в i -ый месяц;

$u_{ср}$ — среднее количество пассажиров, отправленных (прибывших) в среднем в месяц за период наблюдений;

n — количество наблюдений (месяцев) [6, 7].

Расчет коэффициентов корреляции выполнен при помощи средств MS Excel, что позволяет избежать промежуточных вычислений [8]. Результаты расчетов коэффициентов корреляции по исследуемым направлениям сведены в табл. 2.

Исходя из полученных в табл. 2 значений следует, что если на направлении наблюдается сильная корреляция ($r \geq 0,8$) месячного пассажиропотока со среднемесячной температурой в

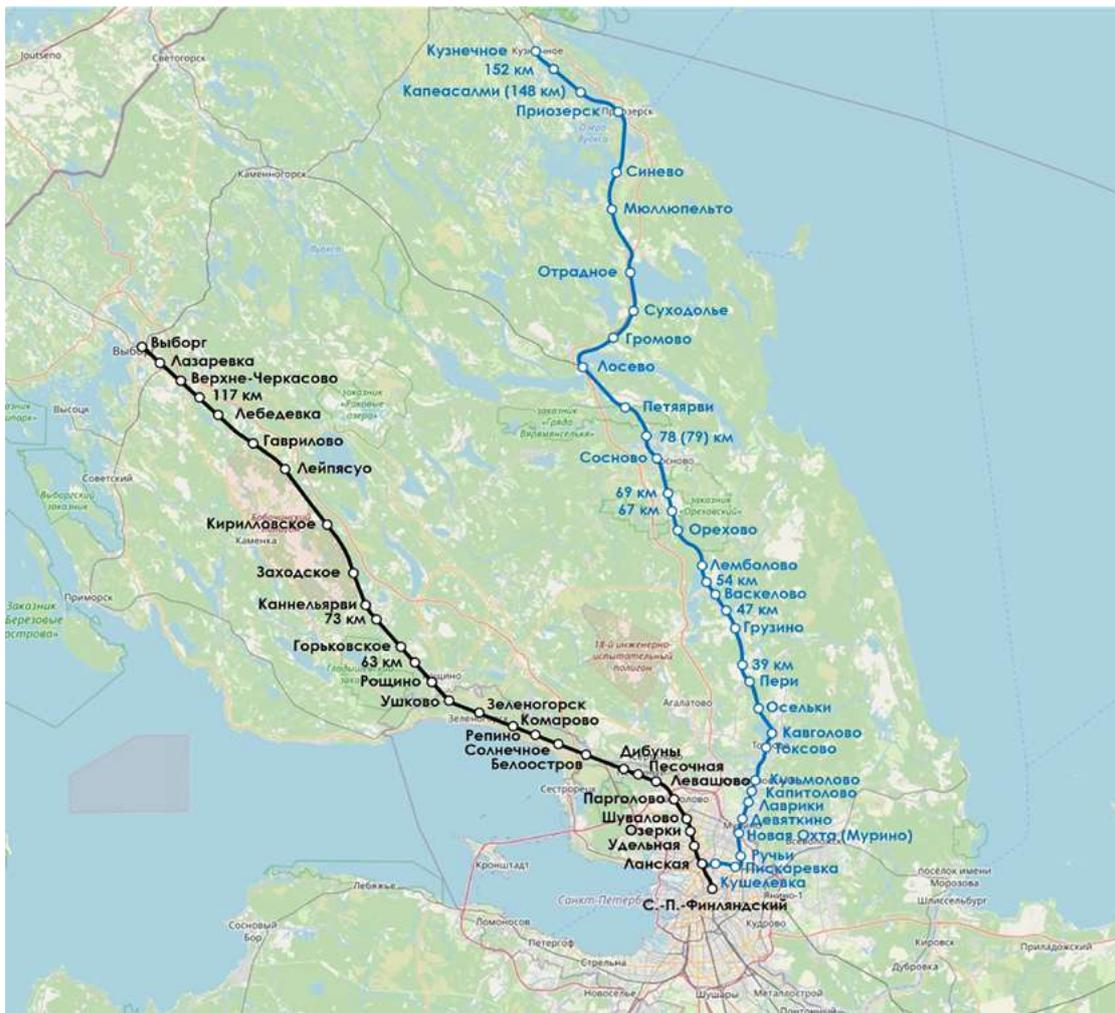


Рис. 1. Схемы Выборгского и Приозерского направлений (черным и синим соответственно)

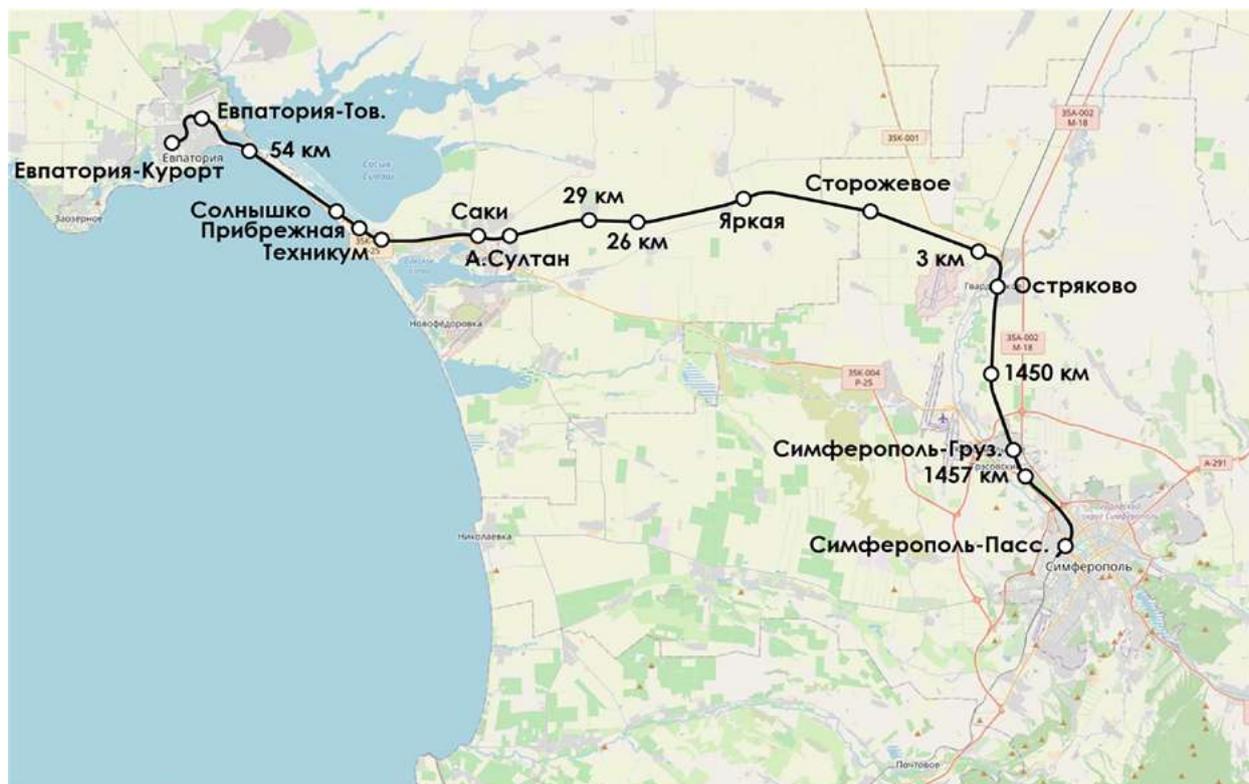


Рис. 2. Схема Евпаторийского направления

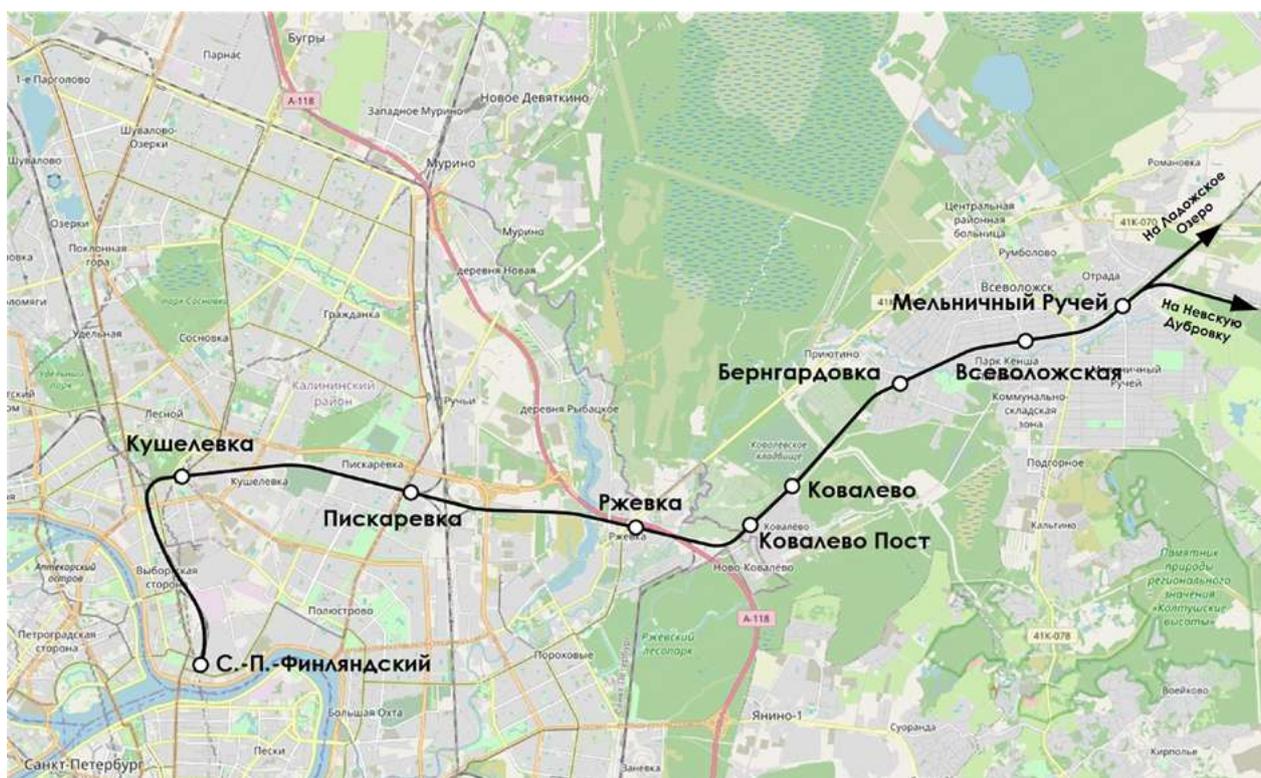


Рис. 3. Схема Ириновского направления

какой-либо год, то она наблюдается и в любой другой год. Аналогично, если сильной корреляции на направлении нет, то ее нет в течение всего периода исследований.

На рис. 1 и 2 представлены схемы пригородных направлений, где $r \geq 0,8$, с привязкой к карте. Отметим, что $r \geq 0,8$ наблюдается именно на тех направлениях, где вдоль железной дороги располагаются места отдыха: берега водоемов, заказники, дачные массивы и т. п. Вдоль таких направлений площади крупных населенных пунктов и предприятий не являются преобладающими.

Например, вдоль Выборгского направления располагаются места массового отдыха — порядка 20 км побережья Финского залива, а также множество других рекреационных зон — «Курортный лесопарк», заказники «Сестрорецкое болото», «Озеро Щучье», «Линдуловская роща», «Гладышевский». Кроме того, конечная точка маршрута — город Выборг — является одним из туристических центров Ленинградской области. Приозерское направление пролегает вдоль множества озер и рек, которые также привлекают большое количество отдыхающих.

Аналогичная ситуация наблюдается и на Евпаторийском направлении, где участок от Саки до Евпатории располагается в больших рекреационных зонах — Черноморском побережье и заказнике «Сасыкский».

На направлениях, где $r < 0,8$, преобладают пассажиропотоки, связанные с маятниковой миграцией населения. Сделать такой вывод позволяет расположение населенных пунктов вдоль данных направлений.

На рис. 3 и 4 представлены схемы пригородных направлений, где $r < 0,8$, с привязкой к карте.

Ириновское направление до ст. Мельничный ручей проходит по территории плотной жилой застройки, что с учетом близости к Санкт-Петербургу позволяет жителям Всеволожска пользоваться железнодорожным транспортом для поез-

док на работу в Санкт-Петербург. Исследованием, выполненным в статье [9], подтверждается стремление жителей Всеволожского района Ленинградской области к работе в ядре агломерации.

Территории, расположенные вдоль Джанкойского направления, используются в основном в сельскохозяйственных целях. К остановочным пунктам пригородных поездов тяготеют только населенные пункты, рекреационные зоны отсутствуют, соответственно, нет и пассажиропотока к местам отдыха.

Классификация пригородных направлений

Направления, где корреляция величины пассажиропотока со среднемесячной температурой воздуха сильнее, характеризуются большей месячной неравномерностью перевозок. Верно и обратное: при слабой корреляционной связи коэффициенты неравномерности находятся в меньших диапазонах, что отражено в табл. 3.

Из результатов сравнения следует, что наличие рекреационных зон на пригородном направлении влияет на неравномерность пассажиропотока, так как связь прослеживается в разных субъектах страны. Касаясь исследований, приведенных в [3, 4], их следует дополнить тем обстоятельством, что величина пассажиропотока зависит от погодных условий только на тех направлениях, где располагаются крупные рекреационные зоны.

Исходя из силы корреляционной связи между месячным пассажиропотоком и среднемесячной температурой воздуха, пригородные направления целесообразно классифицировать на «рабочие» и «рекреационные». «Рабочими» направлениями следует считать те, основной пассажиропоток которых обусловлен маятниковой миграцией населения, а «рекреационными» — направления, пассажиропоток которых обусловлен в большей степени садово-дачными, туристическими и подобными поездками.

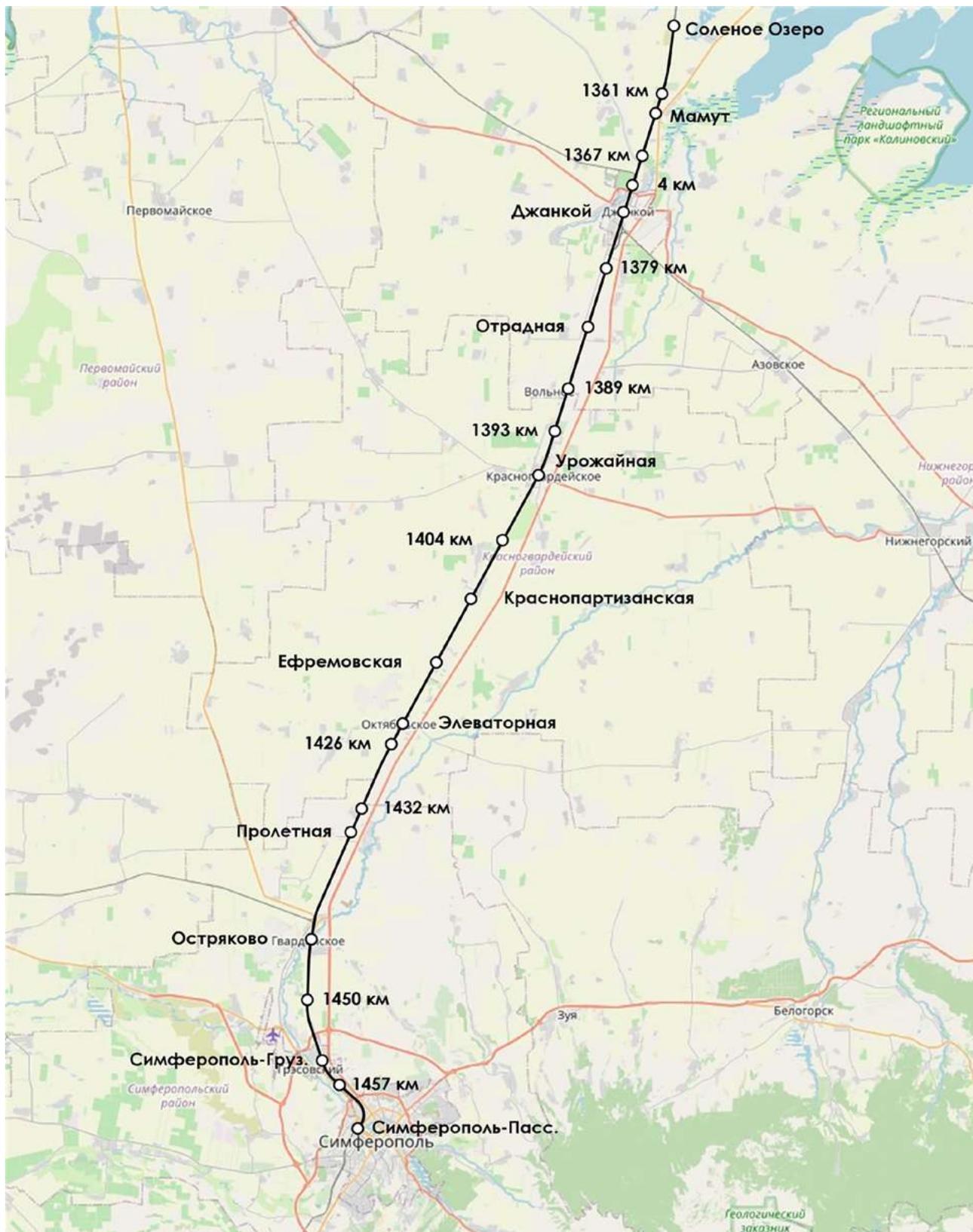


Рис. 4. Схема Джанжуковского направления

Таблица. 3. Сравнительная таблица коэффициентов корреляции и неравномерности

Направление	Год наблюдений									
	2023		2022		2021		2019		2018	
	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>N</i>
Выборгское	0,97	0,66–1,45	0,97	0,57–1,48	0,97	0,62–1,49	0,94	0,66–1,38	0,95	0,66–1,44
Приозерское	0,96	0,67–1,41	0,97	0,61–1,50	0,94	0,62–1,61	0,94	0,70–1,46	0,95	0,66–1,50
Ириновское	0,54	0,76–1,11	0,54	0,76–1,18	0,57	0,68–1,18	0,65	0,82–1,12	0,38	0,82–1,17
Сестрорецкое	0,95	0,69–1,41	0,96	0,62–1,39	0,91	0,57–1,57	0,96	0,68–1,42	0,85	0,74–1,38
Витебское	0,75	0,78–1,12	0,57	0,70–1,23	0,75	0,67–1,17	0,43	0,77–1,16	0,62	0,78–1,20
Балтийское	0,69	0,76–1,16	0,69	0,69–1,14	0,66	0,64–1,16	0,67	0,76–1,16	0,56	0,76–1,24
Севастопольское	0,83	0,77–1,15	0,88	0,60–1,26	0,89	0,64–1,43	н/д	н/д	н/д	н/д
Джанкойское	0,64	0,81–1,13	0,77	0,74–1,13	0,74	0,77–1,12	н/д	н/д	н/д	н/д
Евпаторийское	0,94	0,55–1,88	0,90	0,43–2,08	0,93	0,41–2,45	н/д	н/д	н/д	н/д

R — коэффициент корреляции; *N* — коэффициент месячной неравномерности (диапазон в течение года); н/д — нет данных

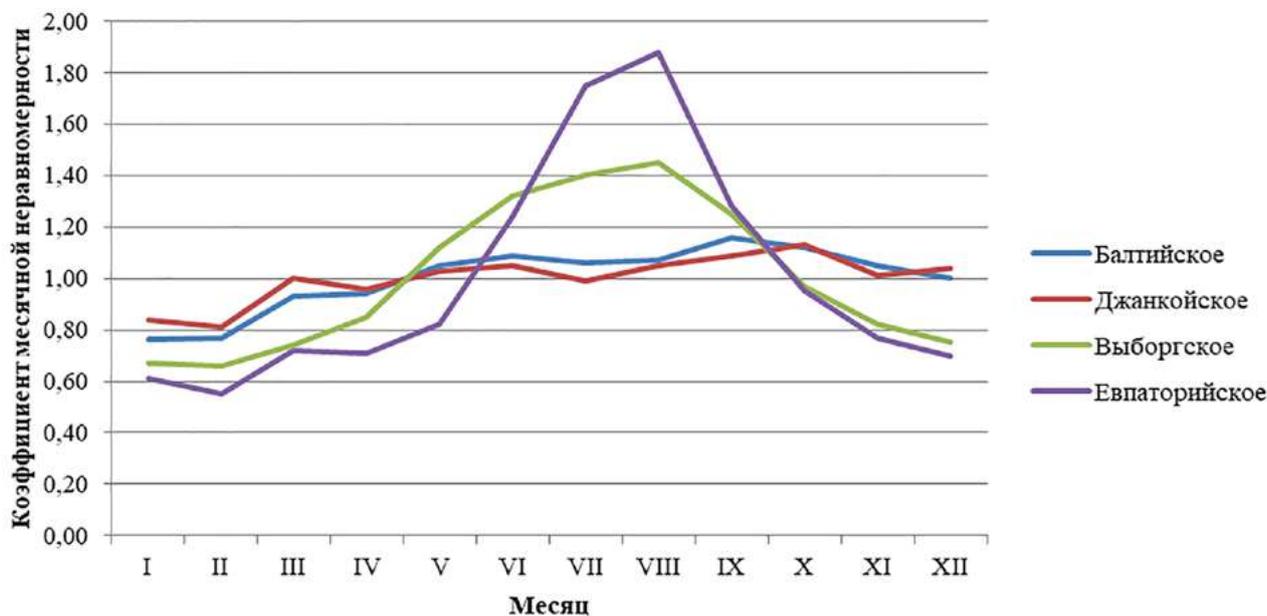


Рис. 5. График изменения коэффициентов неравномерности в течение 2023 года

Подразделение направлений позволяет учитывать территориальное разделение труда и отдыха, что необходимо при прогнозировании величины пассажиропотока, так как территория является фактором, определяющим организацию пригородных перевозок на железнодорожном транспорте [10].

На «рабочих» направлениях прогнозный годовой пассажиропоток по месяцам можно распределять исходя из статистических наблюдений, так как в каждый из месяцев значения коэффициентов неравномерности на них отличается не сильно в течение нескольких лет.

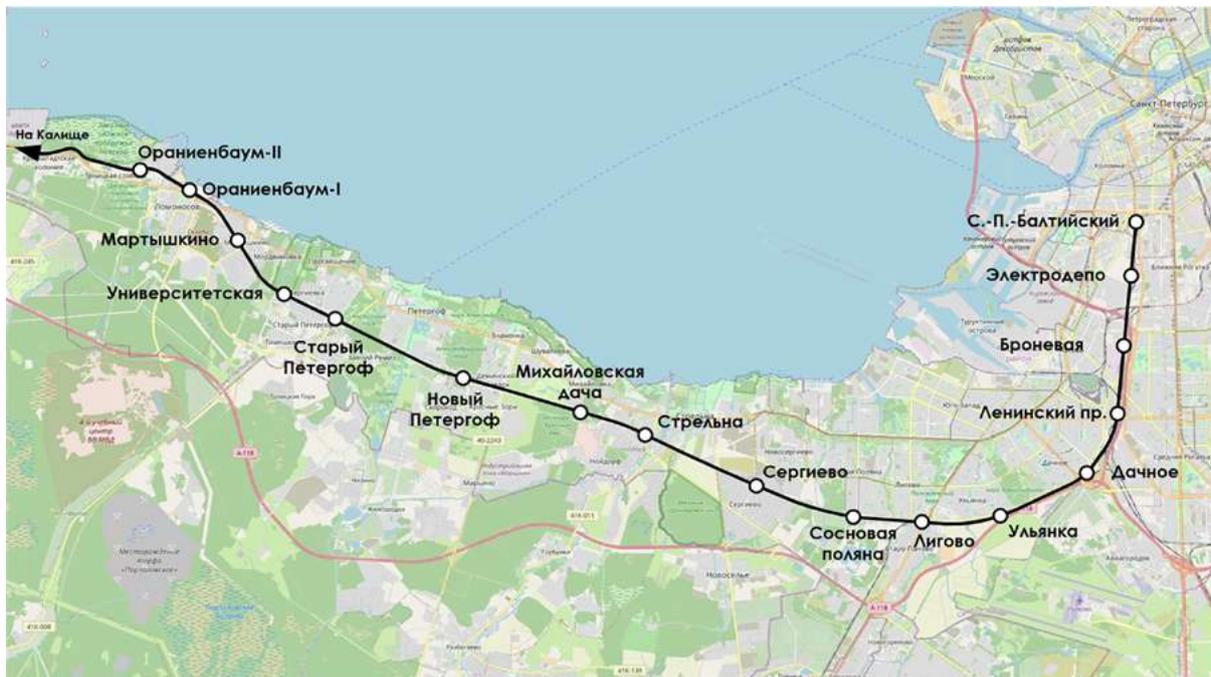


Рис. 6. Схема Балтийского направления

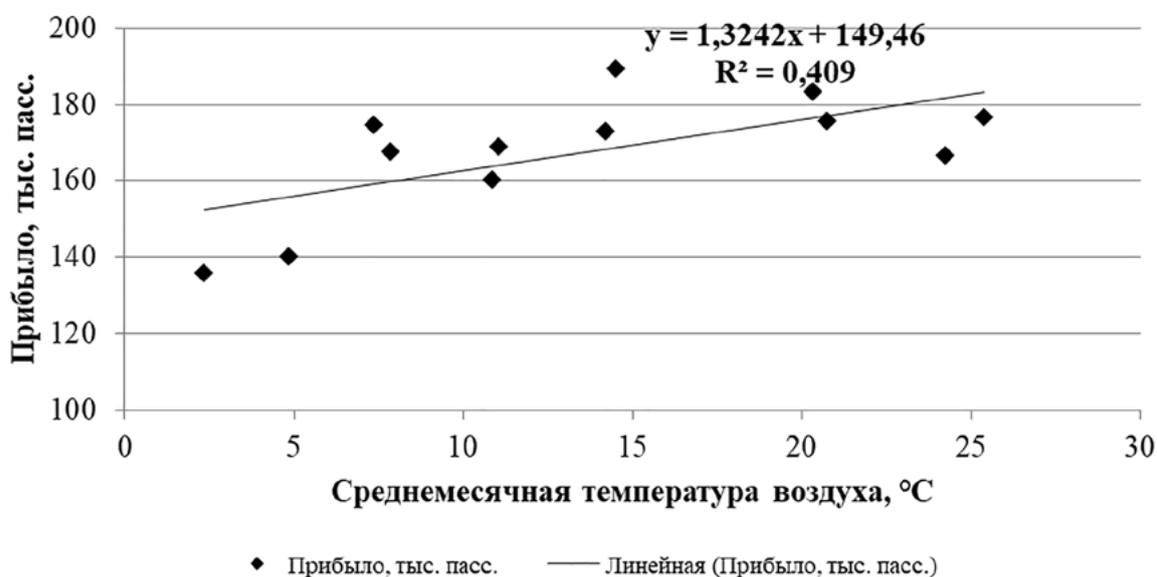


Рис. 7. График корреляционной функции, Джанкойское направление, 2023 г.

На «рекреационных» направлениях следует учитывать фактические данные о среднемесячной температуре за несколько лет и исследования синоптиков.

На рис. 5 наглядно видно, что на «рабочих» направлениях (Балтийское и Джанкойское) максимальные месячные объемы перевозок не при-

ходятся на период с наибольшей среднемесячной температурой воздуха, в отличие от «рекреационных» (Выборгское и Евпаторийское). Снижение объемов перевозок в январе и феврале на обоих типах направлений обусловлено наложением двух факторов: большого количества выходных и

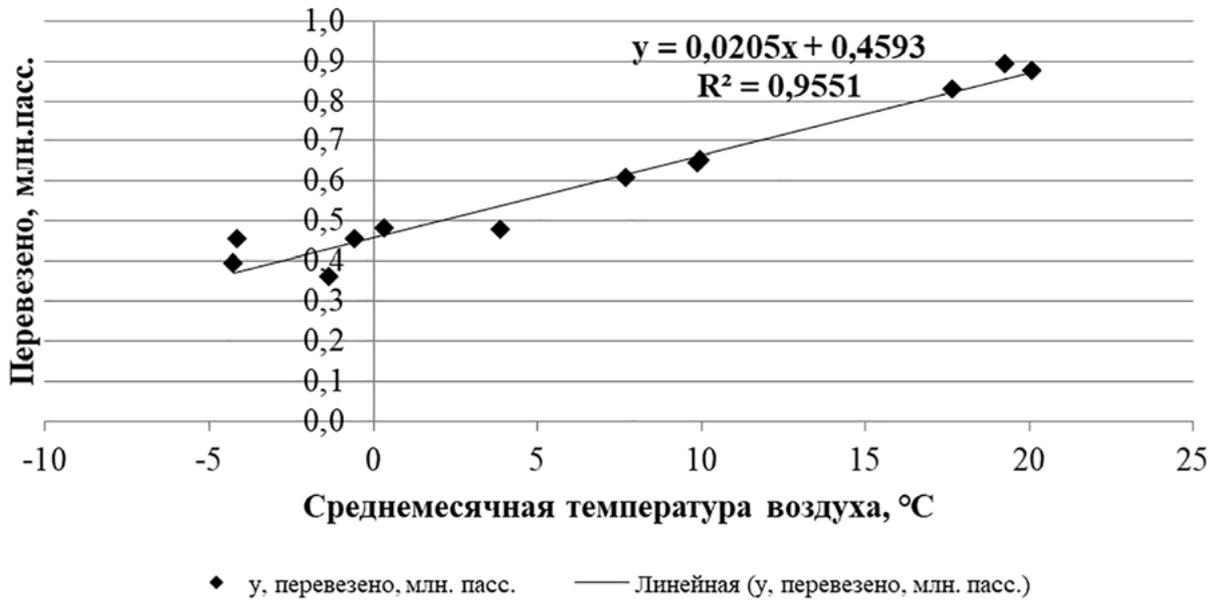


Рис. 8. График корреляционной функции, Приозерское направление, 2022 г.

праздничных дней и низкой среднемесячной температуры.

Географическое расположение направления не всегда однозначно позволяет определить тип направления. Например, вдоль Балтийского направления, схема которого приведена на рис. 6, располагается множество рекреационных зон: южное побережье Невской губы, парк «Александрия», музей-заповедник «Петергоф» и др. Однако направление пролегает через территории жилых районов, в связи с чем сложно предположить, какой пассажиропоток является преобладающим. Для этой цели следует проанализировать связь между среднемесячной температурой воздуха и месячной величиной пассажиропотока.

Из табл. 3 следует, что направление стоит отнести к «рабочим», так как месячная неравномерность невелика, а связь со среднемесячной температурой воздуха слабая.

Характер корреляционной связи наглядно показан на рис. 7 и 8 на «рабочих» и «рекреационных» направлениях соответственно.

Заключение

Анализ корреляционной зависимости между среднемесячной температурой воздуха и месячным пассажиропотоком позволяет отнести направление к одному из двух предложенных типов — «рабочему» (при $r < 0,8$) или «рекреационному» (при $r \geq 0,8$). Такой анализ необходим в случаях, когда по географическому расположению определить тип направления затруднительно.

Предлагаемая классификация направлений требуется для того, чтобы не учитывать одновременно все условия, которые могут оказывать влияние на объем перевозок на разных типах направлений, что влияет на точность прогнозных уравнений или моделей.

Для «рекреационных» направлений необходимо учитывать корреляцию объемов перевозок со среднемесячной температурой воздуха, так как это один из основных факторов, коррелирующих с пассажиропотоком в разрезе месячной неравномерности.

На «рабочих» направлениях необходимо исследовать связь объемов перевозок с количеством рабочих дней в каждом месяце, периодами предоставления отпусков, учебным временем в образовательных учреждениях, а статистические данные о среднемесячной температуре воздуха можно не учитывать или учитывать в значительно меньшей мере, так как погодные условия с месячными пассажиропотоками имеют слабую связь.

Следует отметить, что перечисленные факторы могут не в полной мере отражать месячную неравномерность пассажиропотока, и требуется поиск других зависимостей, позволяющих более точно прогнозировать колебания объемов перевозок.

Дальнейшие исследования будут посвящены поиску дополнительных зависимостей с неравномерностью пригородных перевозок, а также значимости и необходимости учета каждого фактора в отдельности.

Список источников

1. Филиппов А. Г. Определение потребных размеров движения пригородных поездов с учетом суточной и внутрисуточной неравномерностей распределения пассажиропотока / А. Г. Филиппов, С. С. Смирнов, Д. В. Язев и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 4. — С. 528–536. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536.

2. Пазойский Ю. О. Схематический график движения пригородных поездов по выходным дням / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 6(73). — С. 140–147.

3. Балч В. И. Анализ пассажиропотоков для регулирования технических средств пригородных перевозок / Оптимальная эксплуатация железных дорог / В. И. Балч // Труды Московского ин-та инж. ж.-д. транспорта. — М.: Московский ин-т инж. ж.-д. транспорта, 1973. — Вып. 420. — 253 с.

4. Кочнев Ф. П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок / Ф. П. Кочнев. — М.: Транспорт, 1975. — 304 с.

5. Смирнов С. С. Построение графика движения с учетом необходимости оперативного регулирования движения пригородных поездов в зависимости от погодных условий / С. С. Смирнов // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте: сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 17–18 мая 2023 года / Под общей редакцией Г. М. Биленко, И. А. Трушиной. — М.: Российский университет транспорта, 2023. — С. 319–327.

6. Афанасьев В. В. Применение методов математической статистики в научных исследованиях / В. В. Афанасьев // Ярославский педагогический вестник. — 2006. — № 4(49). — С. 5–12.

7. Правдин Н. В. Прогнозирование пассажирских потоков (методика, расчеты, примеры) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей. — М.: Транспорт, 1980. — 222 с.

8. Меженный О. А. Microsoft Office 2010. Краткое руководство / О. А. Меженный. — М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2011. — 368 с.

9. Бугаев М. А. Маятниковые миграции на рынке труда Санкт-Петербурга и Ленинградской области / М. А. Бугаев // Вестник Санкт-Петербургского университета. — 2015. — Сер. 5. — Вып. 4. — С. 86–110.

10. Правдин Н. В. Пригородные зоны и зоны тяготения на железнодорожном транспорте (для условий средних и больших городов Республики Беларусь) / Н. В. Правдин, Т. А. Власюк. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 207 с.

Дата поступления: 24.10.2024

Решение о публикации: 21.01.2025

Контактная информация:

СМИРНОВ Сергей Сергеевич — аспирант;
sss1999@inbox.ru

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — канд. техн. наук,
доц.; docentkostenko@yandex.ru

The Use of Correlation Analysis for Determining Factors Influencing Monthly Commuter Traffic Volumes

S. S. Smirnov, V. V. Kostenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Smirnov S. S., Kostenko V. V. The Use of Correlation Analysis for Determining Factors Influencing Monthly Commuter Traffic Volumes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 19–31. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-19-31

Summary

Purpose: The suburban rail transport operation requires taking into account seasonal irregularities in passenger flows. Although a strong correlation between monthly passenger flows and average monthly air temperature was revealed earlier, it is less pronounced on some routes than on others. The study has been carried out to find out what causes the weak correlation on certain suburban routes and to define the weather impact areas on monthly traffic volumes. **Methods:** The research is based on the statistical reports of transportation companies such as JSC "North-Western Suburban Passenger Company" and LLC "Southern Suburban Passenger Company". The possible relationship between monthly passenger flows and the average monthly air temperature are investigated. Correlation analysis methods and MS Excel tools are used for data processing. The correlation coefficients are considered in combination with the coefficients of monthly unevenness. **Results:** The dependence of the monthly traffic irregularities on the correlation intensity between monthly passenger flows and the average monthly air temperature during the year has been established. The application area of the correlation between the average monthly air temperature and monthly passenger flows has been specified. The suburban routes classification has been proposed based on the factors effecting traffic volumes strongly. **Practical significance:** With a view to predicting, passenger flow changes are more advisable to describe based on a smaller number of factors, so as the prediction errors shall be fewer. For this purpose, the routes are categorised into 'working' and 'recreational' ones, as for each of them a different set of factors should be taken into consideration when making predictive equations or models. The correlation analysis between average monthly air temperature and monthly passenger flows can be useful when a geographical location makes it difficult to determine the type of destination.

Keywords: Irregularities (unevenness), suburban transportation, average monthly temperature, circular migration, recreational area, passenger flow, correlation dependence.

References

1. Filippov A. G., Smirnov S. S., Yazev D. V. et al. Opredelenie potrebnih razmerov dvizheniya prigorodnyh poezdov s uchetom sutochnoj i vnutrisutochnoj neravnomernostej raspredeleniya passazhiropotoka [Determination of the required sizes of commuter train traffic taking into account daily and intraday unevenness in the distribution of passenger traffic]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta*

putej soobshcheniya [Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 528–536. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-4-528-536. (In Russian)

2. Pazojskij Yu. O. Skhematicheskij grafik dvizheniya prigorodnyh poezdov po vyhodnym dnyam [Schematic schedule of commuter trains on weekends]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2017, vol. 15, Iss. 6(73), pp. 140–147. (In Russian)

3. Balch V. I., Savel'ev M. Yu. Analiz passazhiropotokov dlya regulirovaniya tekhnicheskikh sredstv prigorodnykh perevozok. Optimal'naya ekspluatatsiya zheleznykh dorog [Analysis of passenger flows for regulation of technical means of suburban transportation]. *Trudy Moskovskogo in-ta inzh. zh.-d. transporta* [Works of the Moscow Institute of Engineering Railway Transport. Optimal operation of railways]. Moscow: Moskovskij in-t inzh. zh.-d. transporta Publ., 1973, Iss. 420, 253 p. (In Russian)
4. Kochnev F. P. *Optimal'nye parametry prigorodnykh passazhirskih* [Optimal parameters of suburban passenger transportation]. Moscow: Transport Publ., 1975, 304 p. (In Russian)
5. Smirnov S. S. Postroenie grafika dvizheniya s uchetom neobkhodimosti operativnogo regulirovaniya dvizheniya prigorodnykh poezdov v zavisimosti ot pogodnykh usloviy. Pod obshchey redaktsiey G. M. Bilenko, I. A. Trushinoy [Construction of a traffic schedule taking into account the need for operational regulation of commuter train traffic depending on weather conditions. Under the general editorship of G. M. Bilenko, I. A. Trushina]. *Sovremennye metody i printsipy upravleniya perivozochnym protsessom na transporte: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Moskva, 17–18 maya 2023 goda* [Modern methods and principles of managing the transportation process in transport: collected papers of the scientific and practical conference with international participation, Moscow, May 17–18, 2023. Under the general editorship of G. M. Bilenko, I. A. Trushina]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2023, pp. 319–327. (In Russian)
6. Afanas'ev V. V. Primenenie metodov matematicheskoy statistiki v nauchnykh issledovaniyakh [Application of methods of mathematical statistics in scientific research]. *Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik* [Yaroslavl Pedagogical Bulletin]. 2006, Iss. 4(49), pp. 5–12. (In Russian)
7. Pravdin N. V., Negrej V. Ya. *Prognozirovanie passazhirskih potokov (metodika, raschety, primery)* [Forecasting passenger flows (methodology, calculations, examples)]. Moscow: Transport Publ., 1980, 222 p. (In Russian)
8. Mezheny O. A. *Microsoft Office 2010. Kratkoe rukovodstvo* [Microsoft Office 2010. Brief Guide]. Moscow: OOO "I. D. Vil'yams", 2011, 368 p. (In Russian)
9. Bugaev M. A. Mayatnikovyye migratsii na rynke truda Sankt-Peterburga i Leningradskoj oblasti [Pendulum Migrations in the Labor Market of St. Petersburg and the Leningrad Region]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta* [Bulletin of St. Petersburg University]. 2015, part 5, Iss. 4, pp. 86–110. (In Russian)
10. Pravdin N. V., Vlasyuk T. A. *Prigorodnye zony i zony tyagoteniya na zheleznodorozhnom transporte (dlya uslovij srednih i bol'shih gorodov Respubliki Belarus')* [Suburban Zones and Gravity Zones on Rail Transport (for Medium and Large Cities of the Republic of Belarus)]. Gomel': BelGUT Publ., 2007, 207 p. (In Russian)

Received: October 24, 2024

Accepted: January 21, 2025

Author's information:

Sergei S. SMIRNOV — Postgraduate Student;
sss1999@inbox.ru;

Vladimir V. KOSTENKO — PhD in Engineering,
Associate Professor; docentkostenko@yandex.ru

УДК 656.07+06

Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения

О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Числов О. Н., Мизгирева Е. Е., Луганченко Н. М. Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 32–46. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-32-46

Аннотация

Цель: Изложить принципы формирования генетического компоновочного алгоритма при разработке метода размещения объектов транспортного узла, использования и обработки массивов данных. **Методы:** На основе анализа публикаций в направлении данных исследований применена методологическая база генетических алгоритмов, авторские решения линейных диофантовых уравнений в параметризации зон узла, учитываемых при постановке компоновочных задач. **Результаты:** В статье разработан авторский метод решения прикладной задачи размещения объектов транспортного узла в условиях нечетких постановок направлений исследования, формирования массивов данных, их оценки и выбора рациональных вариантов с применением метода Парето и авторского генетического компоновочного алгоритма. Исследована возможная адаптация транспортных характеристик зон узла к перспективным направлениям цифровизации и интеллектуализации инфраструктурно-технологического взаимодействия. **Практическая значимость:** На примере зон узла представлен авторский метод решения прикладной задачи, формирования массивов данных, их оценки и выбора рациональных вариантов с применением метода Парето и генетического компоновочного алгоритма, получен эффект за счет улучшения транспортных связей, рационализации параметров зон, повышения рейтинга узла.

Ключевые слова: Транспортный узел, зоны узла, параметры транспортной работы, математическое моделирование, генетический компоновочный алгоритм, линейные диофантовы уравнения, метод Парето, большие данные.

Введение

Несмотря на санкционные воздействия и кризисные ограничения, обеспечиваются устойчивые показатели работы транспорта РФ за счет рационального развития инфраструктуры, внедрения новых цифровых ресурсов и интеллектуальных информационных технологий, формирования эффективных транспортно-логистических цепей доставки грузов. По данным [1, 2], железнодорожным транспортом за 2023 г. перевезено

1 208,3 млн пасс. (+5,8 % к показателю 2022 г.), погружено 1 235,3 млн т грузов (–0,1 % к показателю 2022 г.), грузооборот составил 2 638,3 млрд тарифных т-км (+0,02 % к показателю 2022 г.). Суммарный грузооборот морских портов Азово-Черноморского бассейна за 10 месяцев 2023 г. составил 251,3 млн т (+17,2 % к периоду 2022 г.).

Транспортный комплекс юга России основывается на многофункциональной и интегрированной системе производственных и транспортных

Таблица 1. Показатели основных транспортных узлов юга России

Транспортный узел	Площадь узла, S , км ²	Население, N , тыс. чел.	Кол-во видов магистрального / городского тр-га, T_M / T_G	Протяженность узловых автомобильных дорог, $L_{авт}$, км	Протяженность узловых железнодорожных путей, $L_{жд}$, км	Протяженность водных путей, $L_{вод}$, км	Коэффициент перспектив развития ВСМ, $V \cdot 100$	Кол-во линий узловых МПК, $N_k \cdot 100$	Класс узла, $R_{ТУi}$ [3]
«А»	208	524	4/1	168,2	78,6	31,2	100	600	37,98
«В»	859	1005	4/5	201,3	147,6	61,6	100	600	59,18
«К»	294	1107	4/4	133	79,2	36,3	300	200	55,36
«Р»	248	1138	4/5	134,9	83,4	26,9	300	700	57,58
«М»	468	604	4/3	97,1	39,6	—	100	200	57,1
«СЧ»	3506	564	4/4	89,3	61,5	—	100	1000	60,88
«ТГ»	80	245	3/5	73,3	32,1	—	0	200	41,62
«ВЛ»	291	296	3/2	49,4	11,1	—	0	200	46,82

технологий, которая включена в экономическую структуру РФ. Юг России имеет густую сеть железных и автомобильных дорог, водных путей, а также обширную систему трубопроводного транспорта.

Транспортные узлы юга России выполняют важнейшие функции: обеспечение непрерывности перевозок грузов и пассажиров, поддержание работоспособности крупных южнороссийских глубоководных портов, экономическая интеграция, сохранение обороноспособности региона и страны в целом. Пространственно-планировочные и инфраструктурно-технологические показатели важнейших узлов юга России сведены в табл. 1.

В связи с современным развитием науки и техники, усложнением и формированием новых логистических цепей, новыми вызовами и требованиями, предъявляемые к перевозкам, необходима разработка инновационных мероприятий по сбалансированному развитию узловой инфраструктуры, видов транспорта при решении задачи размещения объектов и формирование эффективных связей между ними [3].

Теоретические основы метода

В статье разрабатывается новый метод поиска решений компоновочных транспортных задач, учитывающих случайный выбор, нечеткие множества параметров, комбинирование и вариацию массивов больших данных с использованием аналогий естественного отбора в природе. Рассмотрена модификация и применение генетического алгоритма (ГА) в решении задачи размещения зон транспортных узлов («отбор»), их развитие («эволюция и наследование») и изменение («мутации», «скрещивание»). Вопросы применения ГА в научных исследованиях рассматривались в трудах Н. Баричелли (1954 г.), А. Фазера (1957 г.), Г. И. Бремерманна (1960 г.), Барнелла (1970 г.), Кросби (1973 г.), Д. Холланда (1975 г.) и др. [4, 5].

Задача развития ГА в части разработки генетического компоновочного алгоритма размещения объектов транспортного узла (ГКА ТУ) формулируется следующим образом: на заданной территории необходимо наиболее рациональным образом разместить зоны ТУ (производственные, транспортно-складские, защитные, селитебные, рекреационные и др.), чтобы сумма транспорт-

ных расходов на грузо- и пассажирские перевозки в узле была минимальна, а также соблюдались общесистемные требования и ограничения, применяемые к компоновочным решениям (экологические, строительные, транспортной безопасности, надежности и т. п.).

Формулировка задачи:

$$\Pi(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p \left(C_{ijk}^{\text{жд}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{жд}} \cdot Q_{ijk}^{\text{жд}} + C_{ijk}^{\text{авт}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{авт}} \cdot Q_{ijk}^{\text{авт}} + \right. \\ \left. + C_{ijk}^{\text{вод}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{вод}} \cdot Q_{ijk}^{\text{вод}} + C_{ijk}^{\text{ГТ}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{ГТ}} \cdot a_{ijk}^{\text{ГТ}} + \dots \right) \rightarrow \min,$$

где C — стоимость перевозки грузов (пассажиров) видами узлового транспорта, руб/т-км (руб/пасс-км);
 $A^T \{L^*(CD)\}$ — транспонированная матрица модифицированных расстояний перевозки видов транспорта с учетом коэффициента дивергенции зоны узла при кластеризации территории [6, 7];
 Q — объем перевозок грузов видами узлового транспорта i -й зоны узла, тыс. т;
 a — объем перевезенных пассажиров видами узлового транспорта i -зоны узла, тыс. пасс.

Предварительный этап построения математической модели

Для целей формализации ГКА ТУ модифицируется понятийный аппарат: «популяция» — количество объектов транспортных зон с параметрами, соответствующими условиям проектирования; «размножение» — процесс получения новой транспортной зоны на основе наследуемых параметров исходных двух зон («родитель1» — P1 и «родитель2» — P2); «отбор» — выбор из «популяции» тех зон, которые соответствуют установленным критериям рациональности проектирования; «хромосома» — набор параметров конкретной зоны ТУ; «хромосома размещения» (ХР) зон представляет собой связанный список пар координат центров тяжести транспортных зон, участвующих в размещении; «хромосома модификации» (ХМ) зон представляет собой связанный список параметров транспортных зон, участвующих в модификации; кроссинговер — «скрещивание» зон; «оператор мутации» — это вероятностное изменение случайной позиции «хромосомы» — пар координат центров тяжести транспортных зон или вероятностная модификация пар параметров транспортных зон, из которых образуется новая зона; «завершение эволюции» — достижение параметров, определяемых целями компоновки. Следует отметить, что при данном подходе в решении задачи размещения объектов транспортного узла необходимо формирование и использование больших массивов данных.

Рассмотрим данный подход в моделировании размещения зон узла «Р». На рис. 1 представлена схемная матрица узла с точками входа-выхода грузопотоков, геометрическими фигурами основных зон, укрупненным графом транспортных связей и вариантом переноса (объединения) промышленных зон «С-П» и «Р-Т», «Р-Г» и «Р-З».

Размещение зон транспортного узла на принципах ГКА ТУ

Первоначальное размещение зон производится на заданной площади координатной матрицы узла. Каждый объект характеризуется размерами, площадью и представляется правильной или неправильной геометрической фигурой. Находится и оценивается вариант размещения узловых объектов по координатам центра тяжести $\{(x_{\text{ЦТЗ1}}, y_{\text{ЦТЗ1}}), \dots, (x_{\text{ЦТЗ}i}, y_{\text{ЦТЗ}i})\}$.

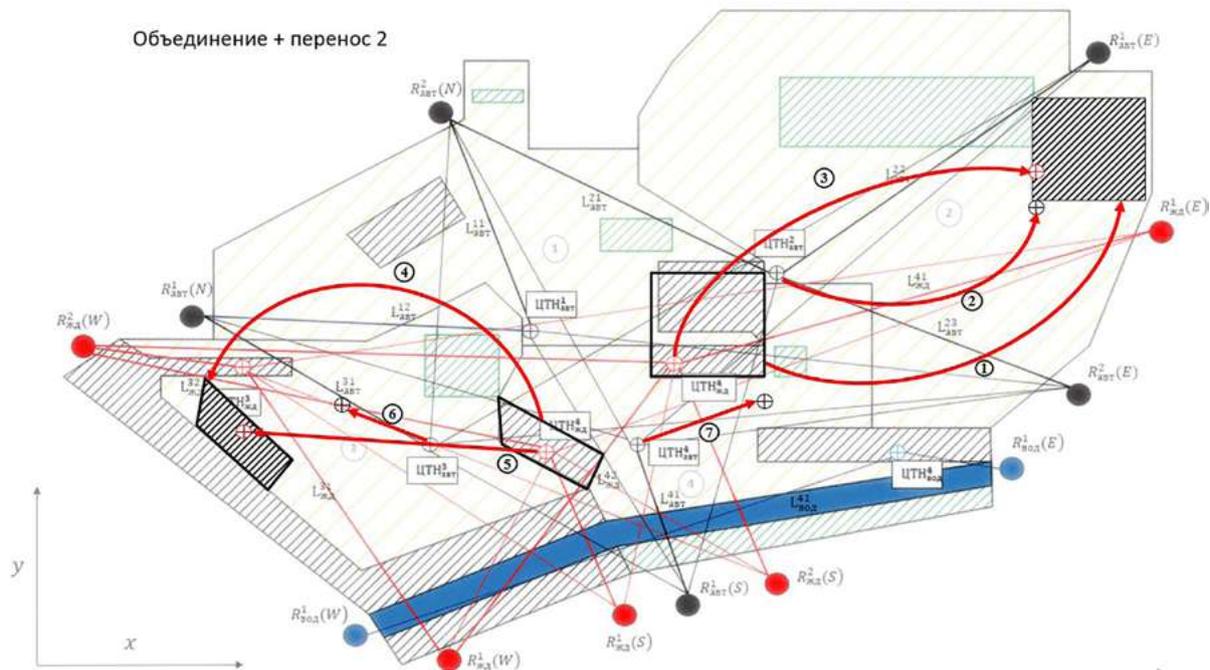


Рис. 1. Матрица транспортного узла «Р» с вариантами перемещения (объединения) зон «С-П» и «Р-Т», «Р-Г» и «Р-З»

Условия компоновки: площадь перекрытия площадей размещенных узловых объектов должна быть равна нулю, $\sum S_{\text{пер}} \rightarrow 0$; суммарная длина транспортных коммуникаций между зонами и точками входа-выхода (пассажиро-) грузопотоков должна быть минимальная, $\sum L(z_j) \rightarrow \min$.

Решение задачи размещения представляется минимизацией функции, выражающей оценку суммы штрафов за перекрытие площадей размещаемых объектов узла и общей длины транспортных связей [2, 7]:

$$P = \sum_{j=1}^n \left(k \cdot G(L(z_j)) + f(S_{\text{пер}}(z_j)) \right) \rightarrow \min,$$

где z_j — вариант размещения;

k — весовой коэффициент важности зоны узла;

$S_{\text{пер}}$ — общая площадь перекрытия площадей размещаемых узловых объектов;

$G(L(z_j))$ — оценка общей длины транспортных коммуникаций, приведенная к интервалу [0,1];

$f(S_{\text{пер}}(z_j))$ — функция штрафов за перекрытие площадей объектов узла, принимающая значения из интервала [0,1].

При размещении объектов согласно ГКА ТУ «хромосома» зоны кодируется списком пар {«номер гена», «значение гена»}, «номер гена» — номер размещаемого транспортного объекта, а «значение гена» — пара координат центра тяжести размещаемой зоны.

На втором этапе решается задача перемещения, объединения, модификации или ликвидации зон узловых объектов при реконструкции (развитии) ТУ. Для этого используется модифицированный алгоритм «размножения» ГКА ТУ: выбираются пары зон ТУ — «родителей» («родитель1» — P1 и «родитель2» — P2), у которых за счет объединения будет по одному «потомку» «П(1,2)» — новой зоны ТУ с параметрами преобладания данных P1 или P2. Для этого используется «кроссинговер» вида «|». При

$$\left(\begin{array}{l} X.-P1:a1|b1,c1,d1,e1,f1 X.-P2:a2|b2,c2,d2,e2,f2 X.-П(1,2):a1,b2,c2,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b1,c1,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1|c1,d1,e1,f1 X.-P2:a2,b2|c2,d2,e2,f2 X.-П(1,2):a1,b1,c2,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c1,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1|d1,e1,f1 X.-P2:a2,b2,c2|d2,e2,f2 X.-П(1,2):a1,b1,c1,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1,d1|e1,f1 X.-P2:a2,b2,c2,d2|e2,f2 X.-П(1,2):a1,b1,c1,d1,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d2,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1,d1,e1|f1 X.-P2:a2,b2,c2,d2,e2|f2 X.-П(1,2):a1,b1,c1,d1,e1,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d2,e2,f1; \end{array} \right)$$

Рис. 2

модификации объектов узла согласно ГКА ТУ «хромосома» кодируется списком $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i)$ — набор параметров i -й транспортной зоны, определенный в безразмерных величинах (по данным табл. 1). Варианты выбора параметров для $X.-P1 \wedge X.-P2 \rightarrow X.-П(1,2)$ показаны на рис. 2.

Затем определяются варианты стратегии развития зон ТУ на основе коэффициента дивергенции

$$[6] \quad CD(ТУ) = \sqrt{\frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}} \rightarrow \min \text{ и показателей ТУ, выраженных в безразмерной форме,}$$

одним из которых является класс узла $R_{ТУ} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(K_{\text{опт } i} \cdot \frac{1}{u} \right)$, где K — количество критериев,

$K_{\text{опт } i}$ — оптимальное стратегическое решение по i -критерию, u — значение приоритета $u \in (1; N)$ для N — количества вариантов развития узла.

Для оценки степени пригодности («выживаемости») зон ТУ используются множества линейных диофантовых уравнений (ЛДУ) [8], количество которых равняется количеству зон. Общий вид уравнения: $T \cdot a_i + L \cdot b_i + B \cdot c_i + S \cdot d_i + A \cdot e_i + P \cdot f_i = R_{ТУ i}$, где T — безразмерный показатель, характеризующий количество видов транспорта зоны; B — показатель ширины зоны; L — показатель длины зоны; S — показатель площади зоны; A — показатель населенности зоны; $R_{ТУ i}$ — класс узла; P — специальный градостроительный показатель зоны ($INT(P) = \pm \alpha_1 \cdot p_1 \pm \alpha_2 \cdot p_2 \pm \alpha_3 \cdot p_3 \dots \pm p_8 \cdot \alpha_8$, где p_1 — грузооборот зоны, тыс. т, p_2 — пассажирооборот зоны, тыс. чел., p_3 — срок службы, год ввода в эксплуатацию зоны; p_4 — плотность застройки зоны (коэффициент застройки), плотность транспортной сети на 1 тыс. хозяйствующих субъектов региона; p_5 — государственная, региональная, социальная, градостроительная значимость; p_6 — категория отрасли промышленности (легкая/тяжелая, обрабатывающая/добывающая, местная/региональная) и показатель уровня транспортного обслуживания структурных отраслей промышленности; p_7 — надежность и устойчивость (развитость) транспортных связей (коммуникаций); p_8 — коэффициент эффективности узловой системы); p_9 — соответствие экологическим нормам, углеродный след; p_{10} — соответствие госпрограммам развития, экономическая потребность в развитии зоны, привлекательность для бизнеса и населения. Данные расчета показателя зоны P представлены в табл. 2.

При решении ЛДУ зон по вариантам размещений результаты больших значений отклонений от имеющихся параметров зоны будут исключаться, так как имеют меньший коэффициент выживаемости. Цикл действий алгоритма повторяется итеративно для имитации «эволюционного процесса» через несколько жизненных циклов («поколений»), пока не будет выполнен один из критериев остановки алгоритма — достижение желаемых параметров компоновки узла [5].

Таблица 2. Ведомость данных расчета показателя P зоны узла

Зона ТУ	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	$INT(P)$
«С-П»	+0,8	+0,9	+0,9	+0,9	+3	+1	+0,1	+0,3	-0,9	+1	8
«Р-Т»	+0,4	+0,3	+0,4	+0,6	+1,5	+0,3	+0,2	+0,3	-0,5	+0,2	3,9
«Р-З»	+0,8	+0,6	+0,4	+0,6	+2,2	+0,4	+0,6	+0,7	-0,2	+0,3	6,4
«Р-Г»	—	+0,8	+0,6	+0,7	+2,5	+0,3	+0,4	+0,8	-0,8	+0,3	5,6

Таблица 3. Ведомость количества решений ЛДУ при размещении зоны «С-П»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	603	3070	2163	4584	603	3874	21–22	141	0	0	0	141	0
1	540	2138	1711	2415	540	2356	23–24	119	0	0	0	119	0
2	540	1435	1334	1124	540	1334	25–26	101	0	0	0	101	0
3	480	921	1022	435	480	686	27–28	84	0	0	0	84	0
4	480	559	769	124	480	308	29–30	70	0	0	0	70	0
5	427	315	565	19	427	112	31–32	57	0	0	0	57	0
6	427	161	405	0	427	28	33–34	47	0	0	0	47	0
7	377	71	281	0	377	3	35–36	37	0	0	0	37	0
8	377	25	188	0	377	0	37–38	30	0	0	0	30	0
9	333	6	120	0	333	0	39–40	23	0	0	0	23	0
10	333	0	72	0	333	0	41–42	18	0	0	0	18	0
11	291	0	40	0	291	0	43–44	13	0	0	0	13	0
12	291	0	20	0	291	0	45–46	10	0	0	0	10	0
13	255	0	8	0	255	0	47–48	7	0	0	0	7	0
14	255	0	3	0	255	0	49–50	5	0	0	0	5	0
15–16	221	0	0	0	221	0	51–52	3	0	0	0	3	0
17–18	192	0	0	0	192	0	53–54	2	0	0	0	2	0
19–20	164	0	0	0	164	0	55–58	1	0	0	0	1	0

Таблица 4. Ведомость количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-Т»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	627	2907	1201	2550	627	1201	16	60	0	0	0	60	0
1	574	1344	956	1375	574	956	17	53	0	0	0	53	0
2	500	515	750	650	500	750	18	39	0	0	0	39	0
3	456	144	579	264	456	579	19	34	0	0	0	34	0
4	393	21	439	78	393	439	20	24	0	0	0	24	0
5	357	0	326	14	357	326	21	21	0	0	0	21	0
6	304	0	236	0	304	236	22	14	0	0	0	14	0
7	275	0	166	0	275	166	23	12	0	0	0	12	0
8	231	0	113	0	231	113	24	7	0	0	0	7	0
9	208	0	73	0	208	73	25	6	0	0	0	6	0
10	172	0	45	0	172	45	26	3	0	0	0	3	0
11	154	0	26	0	154	26	27	3	0	0	0	3	0
12	125	0	13	0	125	13	28	1	0	0	0	1	0
13	111	0	6	0	111	6	29	1	0	0	0	1	0
14	88	0	2	0	88	2	30–58	0	0	0	0	0	0
15	78	0	0	0	78	0							

Таблица 5. Фрагмент ведомости количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-3»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	327	169	327	3465	1568	436	27	59	0	59	0	0	0
1	310	980	310	717	1461	1132	28	57	0	57	0	0	0
2	297	784	297	19	733	845	29	50	0	50	0	0	0
3	286	618	286	0	314	616	30	45	0	45	0	0	0
4	267	478	267	0	106	436	31	41	0	41	0	0	0
...

Таблица 6. Фрагмент ведомости количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-Г»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	651	1020	2317	2535	1020	1020	26	119	5	0	0	5	0
1	369	910	2059	2160	910	1910	27	47	3	0	0	3	0
2	585	810	1141	1008	810	1283	28	15	2	0	0	2	0
3	325	718	469	392	718	825	29	38	1	0	0	1	0
4	524	634	192	113	634	502	30	84	0	0	0	0	0
5	286	558	42	18	558	283	31	30	0	0	0	0	0
...

Рассмотрим пример решения ЛДУ в математическом калькуляторе по вариантам перемещения (объединения) зон «С-П», «Р-Т», «Р-Г» и «Р-3» транспортного узла «Р».

1. Зоны «С-П» и «Р-Т»: для промзоны «С-П» получен 8701 вариант решений уравнения зависимости параметров $1 \cdot a(i) + 6 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 1 \cdot e(i) + 8 \cdot f(i) = 58$; для промзоны «Р-Т» получен 4931 вариант решений уравнения $2 \cdot a(i) + 12 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 4 \cdot f(i) = 58$, где 58 — рассчитанный класс узла.

2. Зоны «Р-3» и «Р-Г»: для промзоны «Р-3» получено 5252 варианта решения уравнения $1 \cdot a(i) + 4 \cdot b(i) + 1 \cdot c(i) + 25 \cdot d(i) + 10 \cdot e(i) + 5 \cdot f(i) = 58$, для промзоны «Р-Г» получено 7783 варианта решения уравнения $1 \cdot a(i) + 9 \cdot b(i) + 2 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 6 \cdot f(i) = 58$.

Количество вариантов решений, при которых значения параметров у коэффициентов ЛДУ зон принимают значения «0», «1», «2» и т. д. до «58», сведено в табл. 3–6.

Формирование и использование массивов данных ГКА ТУ

А. Оценка результатов параметров при решении ЛДУ при размещении основных зон

Для оценки массива данных значений ЛДУ основных зон построены диаграммы Парето, из которых следует, что маловажными являются, например, для зоны «С-П» значения параметров $d(i)$ (4584 значения «0») и $b(i)$ (3070 значений «0»), а оказывающими влияние на компоновку — значения $a(i)$, $c(i)$, $e(i)$ и $f(i)$. Дальнейшими исследованиями предусматривается оценка совместного влияния параметров зон.

Следующий шаг — формирование и использование массивов данных при оценке новых параметров размещения объектов транспортного узла (выполнено в табличном процессоре *MS Excel* по правилу «20/80»). В качестве примера на рис. 3 синим цветом выделено такое количество решений (ячеек), при которых накопленная сумма эффективных результатов была равна 80 %; красным цветом выделяется ячейка с неважными значениями «0», количество которых не влияет на качество решений (иногда дан-

	накопле		накопле		накопле		накопле		накопле		накопле		накопле					
	a(i)	%	b(i)	%	c(i)	%	d(i)	%	e(i)	%	d(i)	%	d(i)	%				
0	627	12,7	11,7	2907	59,0	59,0	1201	24,4	24,4	2550	51,7	51,7	627	12,7	12,7	217	4,4	4,4
1	574	11,6	11,6	1040	21,1	80,0	956	19,4	43,7	1375	27,9	79,6	574	11,6	11,6	956	19,4	23,8
2	500	10,1	21,8	515	10,4		750	15,2	59,0	20	0,4	80,0	500	10,1	21,8	750	15,2	39,0
3	456	9,2	31,0	144	2,9		579	11,7	70,7	264	5,4		456	9,2	31,0	579	11,7	50,7
4	393	8,0	39,0	21	0,4		439	8,9	79,6	78	1,6		393	8,0	39,0	439	8,9	59,6
5	357	7,2	46,2	0	0,0		20	0,4	80,0	14	0,3		357	7,2	46,2	326	6,6	66,3
6	304	6,2	52,4	0			236	4,8		0			304	6,2	52,4	236	4,8	71,0
7	275	5,6	58,0	0			166	3,4		0			275	5,6	58,0	166	3,4	74,4
8	231	4,7	62,7	0			113	2,3		0			231	4,7	62,7	113	2,3	76,7
9	208	4,2	66,9	0			73	1,5		0			208	4,2	66,9	73	1,5	78,2
10	172	3,5	70,4	0			45	0,9		0			172	3,5	70,4	45	0,9	79,1
11	154	3,1	73,5	0			26	0,5		0			154	3,1	73,5	26	0,5	79,6
12	125	2,5	76,0	0			13	0,3		0			125	2,5	76,0	13	0,3	79,9
13	111	2,3	78,3	0			6	0,1		0			111	2,3	78,3	6	0,1	80,0
14	83	1,7	80,0	0			2	0,0		0			83	1,7	80,0	2	0,0	80,0

Рис. 3. Модификация массива данных решений зоны «Р-Т»

ная процедура возможна частично, т. е. используется доля количества неважных «0» согласно условиям проектирования). Таким образом, существенно сокращается интервал решений для параметров зон «С-П» ($a(i) \in [1, 23]$, $b(i) \in [0, 3]$, при этом количество решений со значением «3» уменьшается на 601 ед., $f(i) \in [0, 6]$, при этом количество значений «0» сокращается на 1734 ед.) и «Р-Т» ($a(i) \in [1, 14]$, $b(i) \in [0, 1]$, $f(i) \in [0, 14]$, при этом количество значений «0» сокращается на 984 ед.)

На основе модифицированных результатов производится расчет рационального варианта решения

по методу центра тяжести $X = \frac{\sum_0^n a_i b_i}{\sum b_i}$. Например, для параметра $c(i)$ (рис. 7) зоны «Р-Т»:

$$X_{P-T}^{\hat{a}} = \frac{\sum_0^5 a_i \cdot b_i}{\sum b_i} = \frac{1201 \cdot 0 + 956 \cdot 1 + 750 \cdot 2 + 579 \cdot 3 + 439 \cdot 4 + 20 \cdot 5}{1201 + 956 + 750 + 579 + 439 + 20} = 1,53.$$

Таким образом, анализируя массивы параметров зон, получено:

– для зоны «С-П» имеем средневзвешенное значение $a(i)$ и $e(i)$ — 9,12 (округляем в большую сторону и получаем 10), для $b(i)$ (0;3) — $0,86 \approx 1$, для $c(i) \in (0;4)$ — $1,66 \approx 2$, для $d(i) \in (0;1)$ — $0,34 \approx 1$, для $f(i) \in (0;6)$ — $1,3 \approx 2$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 6 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 1 \cdot e(i) + 8 \cdot f(i) = 1 \cdot 10 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 10 + 8 \cdot 2 = 60.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 2.

– для зоны «Р-Т» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ и $e(i)$ — 5,39 (округляем в большую сторону и получаем 6), для $b(i) \in (0;1)$ — $0,3 \approx 1$, для $c(i) \in (0;5)$ — $1,53 \approx 2$, для $d(i) \in (0;2)$ — $0,36 \approx 1$, для $f(i) \in (0;14)$ — $3,22 \approx 4$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$2 \cdot a(i) + 12 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 4 \cdot f(i) = 1 \cdot 6 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 6 + 8 \cdot 4 = 68.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 10.

– для зоны «Р-3» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ и $c(i)$ — 9,74 (округляем в большую сторону и получаем 10), для $b(i) \in (0;17)$ — $3,41 \approx 4$, для $d(i) \in (0;2)$ — $0,18 \approx 1$, для $e(i) \in (0;5)$ — $1,41 \approx 2$, для $f(i) \in (0;11)$ — $2,61 \approx 3$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 4 \cdot b(i) + 1 \cdot c(i) + 25 \cdot d(i) + 10 \cdot e(i) + 5 \cdot f(i) = 1 \cdot 10 + 4 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 25 \cdot 1 + 10 \cdot 2 + 5 \cdot 3 = 96.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 38.

$$\left(\begin{array}{l} X.-P1:10|1,2,1,10,2 X.-P2:6|1,2,1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1|2,1,10,2 X.-P2:6,1|2,1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2|1,10,2 X.-P2:6,1,2|1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2,1|10,2 X.-P2:6,1,2,1|6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2,1,10|2 X.-P2:6,1,2,1,6|4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,10,4 \text{ or } 6,1,2,1,6,2; \end{array} \right)$$

Рис. 4

– для зоны «Р-Г» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ — 3,2 (округляем в большую сторону и получаем 4), для $b(i) \in (0;6)$ — $1,09 \approx 2$, для $c(i)$ и $e(i) \in (0;14)$ — $5,35 \approx 6$, для $d(i) \in (0;5)$ — $0,95 \approx 1$, для $f(i) \in (0;9)$ — $1,92 \approx 2$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 9 \cdot b(i) + 2 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 6 \cdot f(i) = 1 \cdot 4 + 9 \cdot 2 + 2 \cdot 6 + 10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 = 74.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 16.

Для сортировки значений решений ЛДУ зон ТУ разработана авторская программа в среде *Python*. При сортировке 8701 решения ЛДУ зоны «С-П» по критериям: $a(i)$ и $e(i) = 10$ и $f(i) > 0$ получено 14 рациональных решений. Затем выполнена сортировка для 4931 результата ЛДУ зоны «Р-Т» по критериям $a(i)$ и $e(i) = 6$ и $f(i) > 0$. Получено 10 рациональных решений. Сортировка для 5252 результатов ЛДУ зоны «Р-3» по критериям $a(i) = 10$, $e(i) = 2$ и $f(i) > 0$ — получено 19 рациональных решений, для 7783 результатов ЛДУ зоны «Р-Г» по критериям $a(i) = 4$, $e(i) = 6$, $f(i) > 0$, $c(i) > 0$ — получено 20 рациональных решений.

Далее определяются коэффициенты выживаемости зон-«потомков» на основе результатов решений ЛДУ и отклонений от исходных ЛДУ. Результаты с максимальными отклонениями отбрасываются, и выполняется следующий цикл формирования массивов данных для новой зоны (зон).

Б. Оценка параметров результатов решения ЛДУ зон-«потомков» при объединении/модификации исходных зон

Вариант решения ЛДУ с меньшим отклонением имеет наибольшую вероятность выбора, и набор параметров («хромосом») исходной транспортной зоны «С-П» (P1) является предпочтительней, чем у «Р-Т» (P2). Новая транспортная зона («потомок») содержит информацию о параметрах зон — «родителей». Расположение разделительной линии («кроссинговера») может определяться стратегией переустройства транспортного узла и будущего преобладания желаемых параметров (набора «ген» в «хромосомах»). Пример для выбора параметров новой зоны, полученной в результате объединения/модификации существующих зон «С-П» и «Р-Т» узла «Р», представлен на рис. 4.

$$\text{Уравнение № 1 — } 10 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 4 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 28 428.

$$\text{Уравнение № 2 — } 6 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 10 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 52 977.

$$\text{Уравнение № 3 — } 10 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 10 \cdot A(i) + 4 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 19 400.

$$\left(\begin{array}{l} X. - P1 : 10 | 4, 10, 1, 2, 3 X. - P2 : 4 | 2, 6, 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 2, 6, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 4, 10, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4 | 10, 1, 2, 3 X. - P2 : 4, 2 | 6, 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 6, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 10, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10 | 1, 2, 3 X. - P2 : 4, 2, 6 | 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10, 1 | 2, 3 X. - P2 : 4, 2, 6, 1 | 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10, 1, 2 | 3 X. - P2 : 4, 2, 6, 1, 6 | 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 2, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 6, 3; \end{array} \right)$$

Рис. 5

Уравнение № 4 — $6 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 75 239.

Пример выбора параметров новой зоны, полученной в результате модификации зон «Р-З» и «Р-Г» узла «Р», представлен на рис. 5.

Уравнение № 1 — $10 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 10 867.

Уравнение № 2 — $4 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 14 272.

Уравнение № 3 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 5815.

Уравнение № 4 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 26 604.

Уравнение № 5 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 3961.

Уравнение № 6 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 38 689.

Уравнение № 7 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 10 414.

Уравнение № 8 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 14 863.

Количество решений ЛДУ зон-«потомков» для исходных зон «С-П» и «Р-Т» (4 уравнения), а также ЛДУ зон-«потомков» для исходных зон «Р-З» и «Р-Г» (8 уравнений) определяется в табличных формах аналогично вышеприведенной методике. Таким же образом производится сужение области допустимых решений согласно правилу Парето.

Выбор значений параметров зон-«потомков» по принципу центра тяжести выполняется программным способом в табличной форме. Примеры для ЛДУ № 1 зон-«родителей» «С-П» и «Р-Т», а также для ЛДУ № 1 зон — «родителей» «Р-З» и «Р-Г» представлены на рис. 6.

Подставляя полученные значения, округленные в большую сторону, в ЛДУ зон-«потомков» «С-П» и «Р-Т», получим:

Уравнение № 1 — $10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 4 \cdot 3 = 10 + 9 + 16 + 9 + 12 + 12 = 68$.

Разница по модулю — 10.

Уравнение № 2 — $6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 = 12 + 9 + 12 + 9 + 10 + 12 = 62$.

Разница по модулю — 6.

Для уравнения № 1 («С-П» и «Р-Т»)

	T	L	B	S	P	
0	9728	2050	3874	2050	4680	1620
1	7875	1824	3441	1824	7099	5729
2	3514	1824	3045	1824	4675	4415
3	1275	1617	2684	1617	2930	3341
4	325	1617	2356	1617	1725	2475
5	39	1428	2059	1428	935	1789
6	0,89	1428	1791	1428	452	1256
7		1256	1550	1256	185	851
8		1256	1334	1256	57	553
9		1100	1141	1100	1,81	340
10		1100	970	1100		195
11		959	819	959		102
12		959	686	959		46
13		832	570	832		17
14		832	300	832		4
15		718	5,20	718		3,00
16		718		718		
17		616		616		
18		616		616		
19		525		525		
20		525		525		
21		445		445		
22		445		445		
23		100		100		
22756		8,90		8,90		

Для уравнения № 1 («Р-З» и «Р-Г»)

	T	L	B	S	A	P
0	3600	1443	1700	1443	1700	1443
1	3015	1287	2684	0	2684	1287
2	1386	1144	1791	1287	1791	1144
3	525	1010	1141	0	1141	1010
4	145	891	686	1144	686	891
5	21	783	382	0	382	783
6	0,93	682	192	1010	192	682
7		594	83	0	83	594
8		515	28	891	28	515
9		441	6	0	6	441
10		378	1,88	783	1,88	378
11		322		0		322
12		270		682		270
13		227		0		227
14		155		594		155
15		5,30		0		5,30
16				515		
17				0		
18				441		
19				0		
20				378		
21				0		
22				322		
23				0		
24				270		
25				0		
26				227		
27				0		
28				150		
8692				10,59		

Рис. 6. Выбор значений параметров ЛДУ зон-«потомков»

Уравнение № 3 — $10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 = 10 + 9 + 12 + 9 + 10 + 16 = 66$.

Разница по модулю — 8.

Уравнение № 4 — $6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 12 + 9 + 12 + 9 + 12 + 12 = 66$.

Разница по модулю — 8.

Наименьшая разница по модулю у уравнения 2. Выполним сортировку по параметрам $T = 2, P = 6, A = 1, B = 6, (L, S) > 0$. В результате получена ведомость данных из пятнадцати рациональных решений (рис. 7, а). Наиболее близкие корни для решения уравнения: $T = 2, L = 8, B = 6, S = 8, A = 1, P = 6$. Подставляя полученные значения, округленные в большую сторону, в ЛДУ зон-«потомков» «Р-З» и «Р-Г», получим:

Уравнение 1 — $10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 12 + 12 + 11 + 12 + 12 = 69$.

Разница по модулю — 11.

Уравнение 2 — $4 \cdot 4 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 16 + 16 + 10 + 9 + 12 + 15 = 78$.

Разница по модулю — 20.

Уравнение 3 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 12 + 11 + 12 + 12 = 73$.

Разница по модулю — 15.

Уравнение 4 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 5 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 12 + 10 + 10 + 9 + 12 + 15 = 68$.

Разница по модулю — 10.

Уравнение 5 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 10 + 11 + 12 + 12 = 71$.

Разница по модулю — 13.

Уравнение 6 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 12 + 12 + 12 + 11 + 12 + 15 = 71$.

Разница по модулю — 16.

T	L	B	S	A	P
2	1	6	15	1	6
2	2	6	14	1	6
2	3	6	13	1	6
2	4	6	12	1	6
2	5	6	11	1	6
2	6	6	10	1	6
2	7	6	9	1	6
2	8	6	8	1	6
2	9	6	7	1	6
2	10	6	6	1	6
2	11	6	5	1	6
2	12	6	4	1	6
2	13	6	3	1	6
2	14	6	2	1	6
2	15	6	1	1	6

T	L	B	S	A	P
3	4	1	1	6	5
3	3	1	3	6	5
3	2	1	5	6	5
3	1	1	7	6	5

Рис. 7. Сортировка результатов решений ЛДУ зон-«потомков» по принципу минимального расхождения

Уравнение 7 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 11 + 2 \cdot 6 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 10 + 11 + 12 + 12 = 71$.

Разница по модулю — 16.

Уравнение 8 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 3 \cdot 5 = 12 + 12 + 12 + 9 + 12 + 15 = 72$.

Разница по модулю — 14.

Наименьшая разница по модулю у уравнения 4. Выполним сортировку по параметрам $T=3, P=5, A=6, (L, B, S) > 0$. В результате получена ведомость данных из четырех рациональных решений (рис. 7, б). Наиболее близкие корни для решения уравнения: $T=3, L=1, B=1, S=7, A=6, P=5$.

Обработка показателей и выводы

В результате формируются сводные таблицы параметров в безразмерной форме для исходных зон и зоны-«потомка»:

– для зоны-«потомка» зон «С-П» и «Р-Т»

Зоны ТУ	T	L	B	S	A	P
«С-П»	1	6	4	10	1	8
«Р-Т»	2	12	4	10	2	4
Потомок № 2	2	8	6	8	1	6

– для зоны-«потомка» зон «Р-З» и «Р-Г»

Зоны ТУ	T	L	B	S	A	P
«Р-З»	1	4	1	25	10	5
«Р-Г»	1	9	2	10	2	6
Потомок № 4	2	1	1	7	6	5

Возвращаются значения параметров зон в исходном виде:

– для зоны-«потомка» зон «С-П» и «Р-Т»

Зоны узла	Количество видов транспорта, T	Длина, L , ед.	Ширина, B , ед.	Площадь, S , ед. ²	Население, A , тыс. чел.	Показатель, P
«С-П»	3	28	18,2	533	12	8
«Р-Т»	4	30,7	8,7	267,1	≈ 9	4
Потомок № 2	4	26,1	20,2	320	≈ 7	6

– для зоны-«потомка» зон «Р-З» и «Р-Г»

Зона узла	Количество видов транспорта, T	Длина, L , ед.	Ширина, B , ед.	Площадь, S , ед. ²	Население, A , тыс. чел.	Показатель, P
«Р-З»	3	60,3	10,5	480,4	2	5
«Р-Г»	4	29,7	10	288,9	15	6
Потомок № 4	4	6,9	6,8	93,9	≈ 8,5	5

Далее формируется ведомость показателей транспортного узла после выполненных перестановок и модификаций зон. Например, расчет некоторых из них дал результаты:

– плотность транспортной сети узла $\delta = \frac{L_c}{S_3}$, где L_c — протяженность транспортной сети, км;

S_3 — площадь застроенной территории узла. Для существующего варианта значение составило 0,135 при $L = 211,59$ км, $S = 1569,4$ км², для проектного — 0,511 при $L = 211,59$ км, $S = 413,9$ км²;

– коэффициент Энгеля [9] $d = \frac{L}{\sqrt{SH}}$, где L — общая длина транспортных путей, S — площадь

территории, H — численность населения. Для существующего варианта значение составило 0,866 при $L = 211,59$ км, $S = 1569,4$ км², $H = 38$ тыс. чел., для проектного — 2,642 при $L = 211,59$ км, $S = 413,9$ км², $H = 15,5$ тыс. чел.;

– коэффициент дивергенции узла составил CD (« $P_{\text{сущ}}$ ») = 0,07008, CD (« $P_{\text{пр}}$ ») = 0,06604, т. е. за счет выполненной концентрации инфраструктурных объектов и технологических операций узловая система стала менее однородной, но снизилась нагрузка на центр города, пассажиро- и грузопотоки движутся по менее загруженным транспортным связям.

Таким образом, представленная разработка методики ГКА ТУ при дальнейшей программной реализации и многовариантной апробации выбора вариантов узловых компоновочных решений позволит выполнять предварительный анализ возможных стратегий развития зон ТУ.

Список источников

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. — URL: <http://www.transportrussia.ru> (дата обращения: 22.05.2024).

2. Северо-Кавказская железная дорога. — URL: <http://skzdservice.ru/page/4> (дата обращения: 22.05.2024).

3. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2020. — № 6. — С. 10–19. — DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.

4. Pankratov I. A. Genetic algorithm of energy consumption optimization for reorientation of the spacecraft orbital plane / I. A. Pankratov // Mechatronics, automation,

control. — 2022. — Vol. 23. — Iss. 5. — Pp. 256–262. — DOI: 10.17587/mau.23.256-262.

5. Lyabakh N. Development of the pattern recognition theory for solving the tasks of object classification and yard processes / N. Lyabakh, A. Saryan, I. Dergacheva et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Pp. 59–68. — DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_6.

6. Числов О. Н. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 122–131. — DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_122.

7. Числов О. Н. Методы цифровизации и интеллектуализации параметров логистического взаимодействия в системе «ж.-д. станция — порт» в условиях мультиагентности транспортно-технологических процессов: монография / О. Н. Числов, М. В. Колесников, В. М. Задорожний и др.; ФГБОУ ВО РГУПС; АНО ВО НТУ «Сириус». — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. — 396 с.

8. Zakharov I. V. The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms / I. V. Zakharov, A. O. Shushakov, S. S. Zyкова // *Intelligent Technologies on Transport*. — 2022. — Iss. 3(31). — Pp. 46–51. — DOI 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51.

9. Лебедева Н. А. Оценка транспортной обеспеченности северо-западного федерального округа / Н. А. Лебе-

дева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». — 2021. — № 2. — С. 47–54 — DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-2-47-54.

Дата поступления: 04.11.2024

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой; o_chislov@mail.ru

МИЗГИРЕВА Екатерина Евгеньевна — специалист; brutald@yandex.ru

ЛУГАНЧЕНКО Никита Максимович — аспирант;

luganchenko.n@yandex.ru

Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods

O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, N. M. Luganchenko

Rostov State Transport University (RSTU), 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Chislov O. N., Mizgireva E. E., Luganchenko N. M. Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 32–46. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-32-46

Summary

Purpose: To formulate the principles of a genetic layout algorithm for planning transport hub facilities placement and those of data use and processing. **Methods:** Based on the analysis of the relevant scientific papers, the genetic algorithm method and the author-developed linear Diophantine equations in the parameterization of the node zones considered in the formulation of layout problems are applied. **Results:** The authors have developed an application method for placing transport hub objects in the context of unclear direction of research, data sets formation and their evaluation and rational options using the Pareto method and the authors' genetic layout algorithm. The potential adaptation of hub zones transport specifications to prospective digitalized and intellectualized infrastructure and technology collaboration has been investigated. **Practical significance:** The authors' solution for an applied problem and big data set formation, evaluation and choosing rational options using the Pareto method and a genetic layout algorithm on the example of hub zones is presented. The efficiency is obtained through improved transport links, optimized zone parameters, and higher hub rating.

Keywords: Transport hub, hub zones, transport operation parameters, mathematical modeling, genetic layout algorithm, linear Diophantine equations, Pareto method, big data sets.

References

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. Available at: <http://www.transportrussia.ru> (accessed: May 22, 2024).
2. Severo-Kavkazskaya zheleznaya doroga [North Caucasian Railway]. Available at: <http://skzdservice.ru/page/4> (accessed: May 22, 2024). (In Russian)
3. Solodkiy A. I. Razvitiye intellektual'nykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti ikh resheniya. Novyy etap [Development of intelligent transport systems in Russia: problems and solutions. New stage]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovations. Investments]. 2020, Iss. 6, pp. 10–19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10. (In Russian)
4. Pankratov I. A. Genetic algorithm of energy consumption optimization for reorientation of the spacecraft orbital plane. *Mechatronics, automation, control*, 2022, vol. 23, Iss. 5, pp. 256–262. DOI: 10.17587/mau.23.256-262.
5. Lyabakh N., Saryan A., Dergacheva I. et al. Development of the pattern recognition theory for solving the tasks of object classification and yard processes. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, pp. 59–68. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_6.
6. Chislov O. N., Mizgireva E. E. Printsipy formirovaniya kompleksnogo kriteriya otsenki struktury transportnogo uzla [Principles of Formation of a Comprehensive Criterion for Assessing the Structure of a Transport Hub]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1(93), pp. 122–131. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_122. (In Russian)
7. Chislov O. N., Kolesnikov M. V, Zadorozhniy V. M. et al. *Metody tsifrovizatsii i intellektualizatsii parametrov logisticheskogo vzaimodeystviya v sisteme “zh.-d. stantsiya — port” v usloviyakh mul'tiagentnosti transportno-tekhnologicheskikh protsessov: monografiya*. FGBOU VO RGUPS; ANO VO NTU “Sirius” [Methods of Digitalization and Intellectualization of Parameters of Logistics Interaction in the Railway Station — Port System in the Context of Multi-Agency Transport and Technological Processes: Monograph. FGBOU VO RGUPS; ANO VO NTU “Sirius”]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2022, 396 p. (In Russian)
8. Zakharov I. V., Shushakov A. O., Zykova S. S. The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms. *Intelligent Technologies on Transport*. 2022, Iss. 3(31), pp. 46–51. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51.
9. Lebedeva N. A. Otsenka transportnoy obespechennosti severo-zapadnogo federal'nogo okruga [Assessment of transport provision of the North-West Federal District]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya “Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment”* [Scientific journal of NRU ITMO. Series “Economics and environmental management”]. 2021, Iss. 2, pp. 47–54. DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-2-47-54. (In Russian)

Received: November 04, 2024

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. of Engineering, Professor, Head of the Department; o_chislov@mail.ru

Ekaterina E. MIZGIREVA — Specialist; brutald@yandex.ru

Nikita M. LUGANCHENKO — Postgraduate Student; luganchenko.n@yandex.ru

УДК 656.02

Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта

Л. А. Лосин^{1, 2}, Н. А. Калюжный¹

¹Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лосин Л. А., Калюжный Н. А. Определение потенциала полицентричности городских районов на основе математического моделирования систем городского пассажирского транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 47–59. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-47-59

Аннотация

Цель: Определить возможности применения методов транспортно-градостроительного моделирования для обоснования размещения субцентров в рамках полицентрической модели развития городов. Предложить численные критерии размещения потенциальных городских центров в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения и разработать систему градации районов на основе данных критериев. На примере Петербургской агломерации определить значения прироста населения, остающегося в своих районах проживания, при увеличении средних затрат времени на передвижения. Отранжировать исследуемые районы по уровню эффективности организации на их основе субцентров. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Проанализированы применяемые в современных транспортных моделях методики расчета матриц межрайонных корреспонденций. Предложена гипотеза определения уровня самодостаточности городских районов, на основе которых целесообразна организация субцентров. Разработаны численные критерии размещения потенциальных городских центров в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения, и предложена система градации районов на основе данных критериев. Проведена апробация решения задачи определения целесообразности организации субцентров на примере Петербургской агломерации. Сформулированы выводы о возможности использования методов математического моделирования для обоснования размещения субцентров в городах и агломерациях на основе предложенных численных критериев. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут служить основой для расширения круга задач, решаемых на основе методов транспортно-градостроительного моделирования. Разработанные подходы и критерии могут использоваться при разработке проектных решений в составе стратегий и концепций территориального развития городов в части обоснования возможности организации полицентрической модели.

Ключевые слова: Транспортное моделирование, агломерация, полицентрическая модель, матрица корреспонденций, транспортный спрос, максимизация энтропии.

Введение

Планирование развития современных городов и формируемых ими систем расселения на основе принципов полицентризма является признанной во многих странах моделью. Согласно [1] под полицентрической системой расселения понимается система расселения, имеющая два и более сопоставимых многофункциональных центра. Как указывают авторы [2], специфическая черта полицентричного города, полицентричной системы расселения и городской агломерации — наличие на их территории нескольких центров притяжения разнообразных и значимых потоков и видов деятельности. Эффективность полицентрической модели организации городской территории определяется, в частности, тем, что таким образом обеспечивается минимизация городских передвижений за счет формирования относительно «самодостаточных» районов, внутри которых обеспечивается замкнутый цикл ежедневных передвижений населения. Ключевым вопросом при обосновании возможности организации полицентрической структуры в городах и агломерациях является выделение таких территорий, на базе которых реализация модели полицентрической структуры становится наиболее эффективной.

В опубликованной ранее работе [3] была выдвинута и подтверждена на основе методов математического моделирования гипотеза существования «скрытых» субцентров, т. е. не совсем явных пространств городов (агломераций), обладающих признаками самодостаточности. Поскольку город исторически обычно развивается в соответствии с закономерностями моноцентрической модели, его градостроительное и социально-экономическое развитие, характерное для современного этапа, приводит к постепенной, но не во всем явной естественной полицентрализации городской структуры. Таким образом, при изучении потенциала полицентрического развития города

можно не дифференцировать территорию на основе каких-либо факторов, а попытаться обнаружить уже сложившиеся в той или иной мере или формирующиеся потенциальные городские (в сравнении с главным городским центром) субцентры.

Методы исследования и информационная база

Описываемое в статье исследование посвящено определению возможностей организации относительно «самодостаточных» районов в крупных и крупнейших городах на основе применения методов транспортного моделирования. Расчеты в рамках описываемых исследований выполнены на базе информационно-программного комплекса (ИПК) Citraf¹, позволяющего решать ряд задач на основе транспортно-градостроительного моделирования. Описание возможностей и теоретических основ данного комплекса представлено в публикациях [4–7]. В основе данного комплекса лежит классическая четырехступенчатая транспортная модель [8], при этом в рамках описываемого исследования использовались только первые два этапа: генерация поездок и распределение поездок между зонами (транспортными районами). Результат этих расчетных процедур — матрицы межрайонных корреспонденций, элементы которых содержат численные показатели количества участников передвижений между каждой парой транспортных районов, включая внутрирайонные передвижения (диагональные элементы матрицы). Межрайонные корреспонденции в городах — это реализуемые населением передвижения по различным целям

¹ Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / Заявитель и правообладатель Федоров В. П. (RU). № 2018611770. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ — 06.02.2018.

(трудовым, деловым, учебным, культурно-бытовым и т. д.) между пунктами отправления и прибытия, агрегируемыми в модели в структуру расчетных транспортных районов [9].

Подход, при котором в рамках научных исследований или проектных работ используется только часть расчетных процедур, входящих в четырехэтапную схему моделирования, широко известен в практике транспортно-градостроительного планирования. На этапе становления современных транспортных моделей, когда возможности моделирования были существенно ограничены мощностью вычислительной техники того времени, применение части процедур было во многом обусловлено необходимостью экономии вычислительных ресурсов. В современной же практике моделирования такой подход оправдан в случае, когда для анализа функционирования транспортной системы бывает достаточным использование промежуточных результатов, в частности матриц корреспонденций. На основе этой информации возможно получение общих представлений о функционировании транспортной системы города (агломерации): анализ матриц позволяет оценить мощность и направление основных транспортных связей и их конфигурацию, из которых складывается основной транспортный каркас города, влияющий в том числе на структуру пространственной организации города в целом [10]. Обоснование целесообразности использования упрощенных вычислительных процедур при решении некоторых транспортно-градостроительных задач встречается в ряде публикаций: в частности, по мнению известных специалистов в области урбанистики А. Э. Гутнова и В. Л. Глазычева, «использование очень сложных математических моделей неэффективно — слишком велики при этом затраты времени и средств на подготовительные работы, так что традиционное проектирование при всех своих слабостях оказывалось в выигрышном

положении. Напротив, относительно простые имитационные или оценочные модели, и прежде всего транспортной доступности территорий, интенсивности их использования в жизни города, стали реальным и весьма эффективным, но вспомогательным средством при сопоставлении вариантов, формируемых более или менее традиционно» [11].

В качестве исходной информационной базы для моделирования в рамках данного эксперимента используются данные о транспортной сети Петербургской агломерации (транспортный граф сети городского пассажирского транспорта, включающий элементы улично-дорожной сети и сети внеуличного транспорта) и свойства территории (система транспортного районирования), а также численные параметры, характеризующие поведение участников передвижения. Необходимость использования в модели транспортного графа, несмотря на то что решение задачи ограничивается определением матриц передвижений, обусловлено тем, что расчет матрицы осуществляется сетевым способом, при котором затраты времени на передвижения между транспортными районами рассчитываются с учетом скоростных возможностей и ограничений сети [12].

В рамках эксперимента использовалась модель, построенная в пределах Петербургской агломерации: транспортный граф содержит 2751 элемент, в том числе 693 элемента соответствуют сети внеуличного транспорта — метрополитена и пригородной железной дороги, включая графические элементы, описывающие пересадочные узлы [13]. Система транспортного районирования включает 353 района, в том числе внешние районы-«кордоны» [14]. В качестве расчетного периода для моделирования используется утренний среднемаксимальный час [15]. Такой подход позволяет производить расчет на один из двух периодов максимальных пассажиропотоков в течение дня и одновременно нивелиро-

вать «волну», при которой период максимальной загрузки сети в утренние часы «перемещается» от периферии к центру города.

К настоящему времени в практике транспортно-градостроительного моделирования известно много методик расчетов матриц межрайонных корреспонденций. В целом все эти методы могут быть разделены на несколько классов [16]:

1. Экстраполяционные методы (модели общего фактора роста).

2. Реляционные методы (методы восстановления матриц по данным потокораспределения).

3. Вероятностные методы.

Наиболее универсальными для решения задач транспортно-градостроительного планирования являются вероятностные методы; их применение имеет широкое распространение в современных комплексах транспортного моделирования. Безусловным преимуществом таких методов является возможность проведения расчетов на перспективные периоды с учетом изменений в структуре расселения и размещения объектов тяготения. Наиболее распространенными моделями данного класса являются гравитационная и энтропийная. Энтропийная модель, реализованная в том числе на базе ИПК Citraf, основана на вероятностном описании поведения участников передвижения [17]. Именно такой подход в наибольшей степени соответствует задачам описываемого эксперимента, в котором оценивается вероятность поведения жителей города в зависимости от задаваемых внешних условий.

Как было сказано выше, наиболее распространенным методом расчета межрайонных корреспонденций является «энтропийный» подход [18]. Решение задачи максимизации энтропии распределения транспортного спроса может быть интерпретировано как наиболее вероятное среди всех возможных распределений, которые возникают в процессе реализации массового поведения, j , с учетом задаваемых предпочтений и ограниче-

ний. Решение данной задачи, интерпретируемое некоторыми авторами как «дележ в стесненных условиях», приводит к формулировке принципа максимума взвешенной энтропии [19]. При этом в данном исследовании в качестве критерия при расчете матрицы корреспонденций выступают только затраты времени на передвижения, хотя на выбор участников передвижения оказывают также влияние финансовые затраты, уровень надежности и т. д. [20].

В ИПК Citraf матрица корреспонденций в соответствии с «энтропийным» подходом формируется при решении задачи максимизации энтропии, взвешенной относительно исходного предпочтения [21]:

$$\sum_{i,j} x_{ij} \ln \left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right) \Rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_j x_{ij} = P_i, i = 1, \dots, nr \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij} = Q_j, j = 1, \dots, nr \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

где i, j — транспортные районы;

x_{ij} — элементы искомым матриц корреспонденций;

$\sum_{i,j} x_{ij} \ln \left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}} \right)$ — «взвешенная» энтропия распределения;

P_i — объем отправок из района i ;

Q_j — объем прибытий в район j .

Предполагается, что сумма отправок равна сумме прибытий: $\sum P_i = \sum Q_j$.

Значения y_{ij} показывают вероятности реализации корреспонденций между районами i и j на основе известных закономерностей рассе-

ления жителей города по отношению к местам их работы, сформулированных в форме «закона трудового тяготения»: «трудящиеся по мере удаления от места работы расселяются во все меньших количествах, следуя кривой убывающей прогрессии» [22]. Такой характер взаимного расположения мест отправления и прибытия ежедневных трудовых передвижений продиктован естественным стремлением жителей городов минимизировать затраты времени на передвижения, воспринимаемые как непродуктивные. В практике транспортного моделирования убывание вероятности совершения корреспонденции с увеличением затрат времени на передвижения описывается функцией тяготения, имеющей вид: $\exp(-\gamma t)$, где $\gamma > 0$ — «параметр расселения», который может быть откалиброван по данным средних показателей затрат времени для всей системы передвижений. Таким образом:

$$y_{ij} = \exp(-\gamma t_{ij}),$$

где t_{ij} — затраты времени на передвижение из района i в район j .

Определение потенциала полицентричности территории (на примере Санкт-Петербурга)

В рамках проведенного эксперимента на базе ИПК Citraf построена модель ранжирования территории города в целях выявления районов с наибольшим потенциалом полицентричности. Для решения этой задачи проведены расчеты матриц передвижений на городском пассажирском транспорте между транспортными районами. Была выдвинута следующая гипотеза: чем больше наблюдается увеличение объема внутрирайонных корреспонденций при снижении среднего времени передвижения по городу, тем более самодостаточным является район. Иными словами, чем больше прирост внутрирайонных корреспонден-

ций при снижении среднего времени, тем больше людей могут позволить себе оставаться в своем районе, т. е. тем больше потенциал полицентричности внутри данного района. Потенциал полицентричности в рамках данной гипотезы связан с уровнем взаимной сбалансированности мест проживания населения и мест приложения труда при обеспечении приемлемых затрат времени на трудовые корреспонденции, осуществляемые внутри районов проживания.

Для учета всей системы ежедневных трудовых передвижений в качестве внешней границы системы районирования принята граница Петербургской агломерации, но ранжирование территорий по потенциалу полицентричности производилось для собственно «городских» территорий без учета пригородной зоны, т. е. для ядра агломерации [23]. Именно в ядре агломерации наименее выраженным остается потенциал полицентричности, так как застройка этой территории является более однородной по сравнению с поясами ближних и дальних пригородов.

В рамках эксперимента предлагается следующая последовательность действий:

1. Разбиение территории ядра Петербургской агломерации на районы исследования, ограниченные естественными и искусственными преградами (водотоками, магистральными железнодорожными линиями и т. д.); центральная часть Санкт-Петербурга, включающая в себя Василеостровский, Петроградский, Центральный и Адмиралтейский (севернее Обводного канала) районы, исключена из рассмотрения. Выбранный подход к разбиению территории позволяет выделить относительно изолированные территории внутри рассматриваемой территории, на базе которых могут быть организованы субцентры (рис. 1).

2. Задание некоторого шага средних затрат времени, для каждого из которых произведен расчет матриц межрайонных передвижений. В рамках

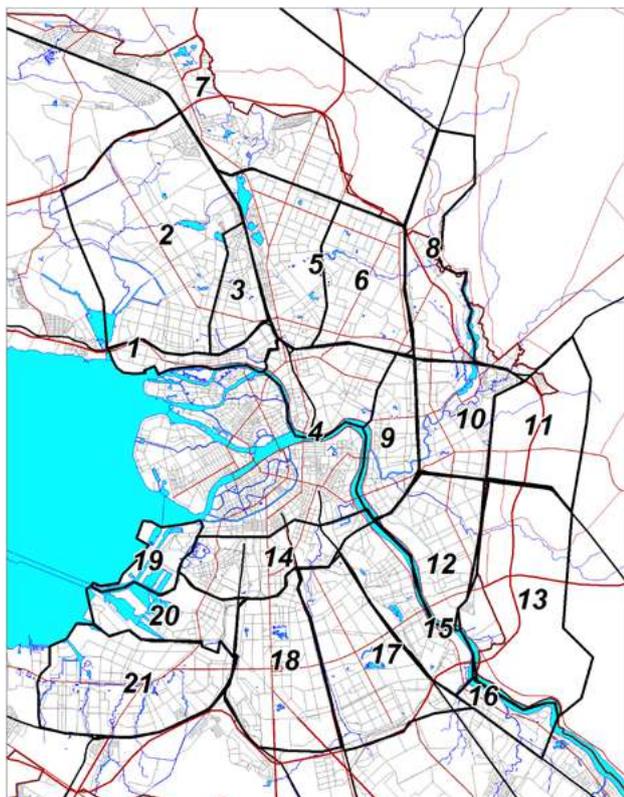


Рис. 1. Разбиение территории ядра Петербургской агломерации на районы исследования

Таблица 1. Последовательность параметров расчетных шагов

Шаг	Параметр функции тяготения γ	Среднее время, мин	Средняя дальность, км	Средняя скорость сообщения, км/ч
1	0,04	62,86	17,33	16,66
2	0,05	55,89	14,96	16,18
3	0,06	50,50	13,14	15,72
4	0,07	46,22	11,74	15,30
5	0,08	42,80	10,65	14,99
6	0,09	40,00	9,78	14,73
7	0,10	37,63	9,08	14,52

данного эксперимента среднее время передвижения по трудовым целям в пределах агломерации с каждым шагом равномерно уменьшается с 62,86 до 37,63 минуты. Среднее время выражается дробными значениями, так как в рамках «энтропийной» модели среднее время задается не напрямую, а рассчитывается на основе зада-

Таблица 2. Результаты расчетов объемов внутрирайонных корреспонденций (шаги 1, 7)

Район исследования	Внутрирайонные корреспонденции, тыс. пасс. в час		Прирост остающихся в своих районах исследования
	шаг 1	шаг 7	
1	0,72	3,13	4,35
2	4,27	12,88	3,02
3	0,33	1,26	3,82
4	2,91	8,35	2,87
5	3,45	9,46	2,74
6	4,25	11,98	2,82
7	2,80	9,08	3,24
8	0,68	3,33	4,90
9	1,01	3,41	3,38
10	2,05	7,35	3,59
11	0,07	0,30	4,29
12	4,91	15,35	3,13
13	1,80	7,61	4,23
14	3,95	9,40	2,38
15	1,97	7,50	3,81
16	0,26	1,97	7,58
17	3,41	11,93	3,50
18	4,80	14,41	3,00
19	0,07	0,46	6,57
20	0,65	2,54	3,91
21	6,00	15,00	2,50

ваемого параметра функции тяготения γ (1–3). Последовательность изменения параметров расчетных шагов представлена в табл. 1.

3. Расчет матриц межрайонных корреспонденций на городском пассажирском транспорте для каждого расчетного шага с выделением объема внутрирайонных передвижений. Важно, что исследуемые в рамках эксперимента районы (районы исследования) не тождественны расчетным транспортным районам, используемым в модели, но районы исследования включают в себя целое число расчетных транспортных районов. Результаты расчетов сведены в табл. 2 и представлены на рис. 2. Картограмма распределения параметров изменения объемов внутрирайонных корреспонденций позволяет отранжировать все районы по потенциалу полицентричности (рис. 3).

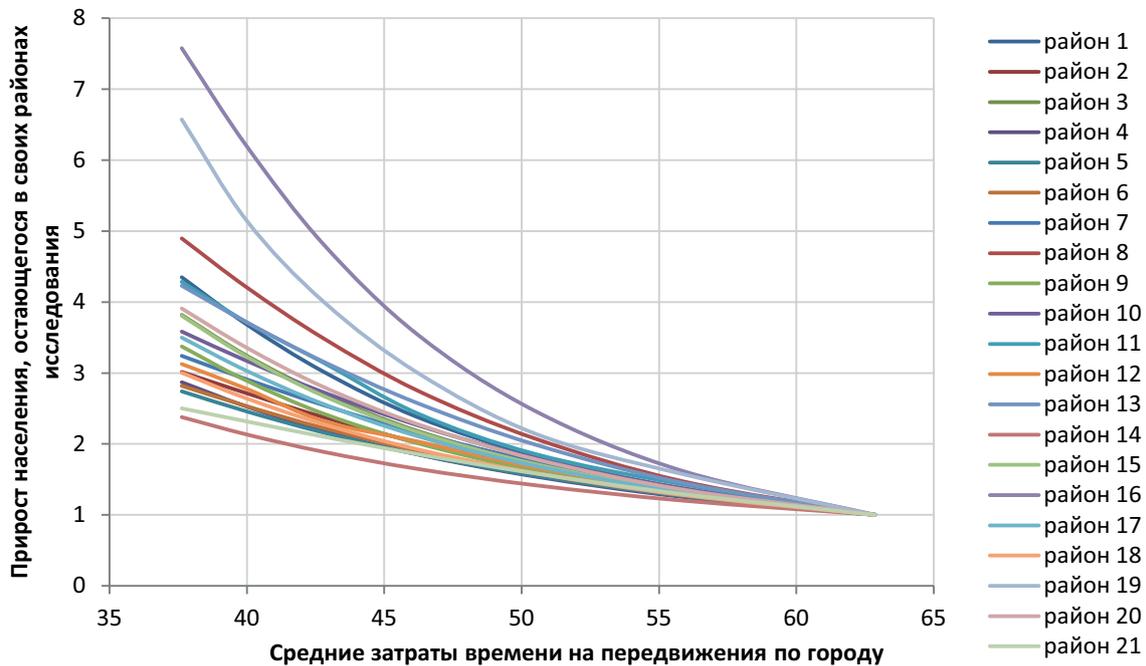


Рис. 2. Зависимость прироста населения, остающегося в своих районах исследования, от средних затрат времени на передвижения

Прирост остающихся в своих районах можно представить как:

$$\Delta N = \frac{N_7}{N_1}, \tag{4}$$

где ΔN — прирост жителей, остающихся в своих районах, чел.;

N_7 — значение внутрирайонной корреспонденции на шаге 7, чел.;

N_1 — значение внутрирайонной корреспонденции на шаге 1, чел.

Получившийся показатель прироста населения, остающегося в своих районах исследования, при изменении средних затрат времени ΔN можно интерпретировать как коэффициент полицентричности. Данный коэффициент является определяющим численным критерием при анализе транспортной доступности территории. Он показывает, насколько район исследования нуждается в улучшении транспортной обеспеченности и связности, а также насколько целесо-

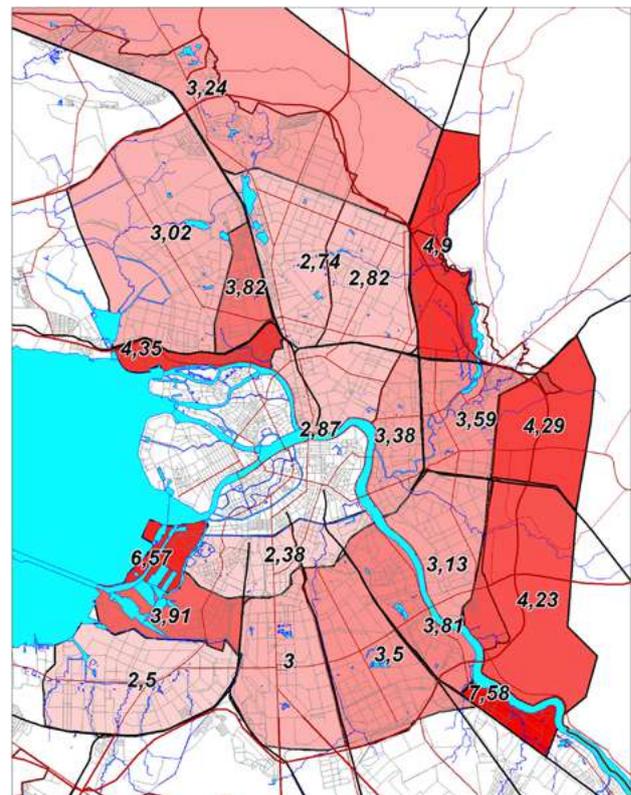


Рис. 3. Картограмма распределения районов исследования в зависимости от коэффициентов полицентричности

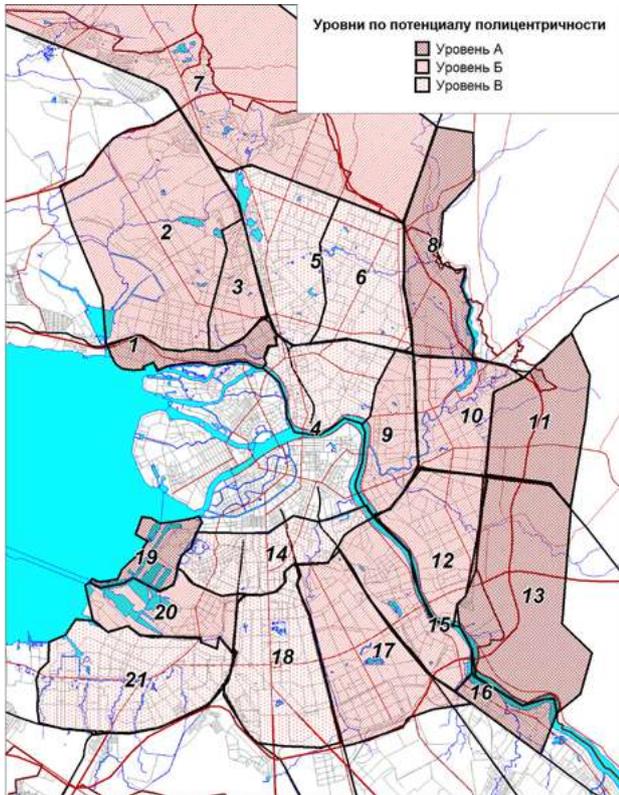


Рис. 4. Ранжирование районов исследования по потенциалу полицентричности

образно дальнейшее развитие района на основе организации внутри него субцентров, в том числе транспортно-пересадочных узлов. Таким образом, чем выше коэффициент полицентричности, тем более «самодостаточным» является район исследования.

На основе найденных значений коэффициента полицентричности предлагается следующая градация районов исследования по уровням (рис. 4):

– Уровень А. Прирост остающегося населения (коэффициент полицентричности) свыше 4 (районы: 1, 8, 11, 13, 16, 19). Районы обладают отчетливыми признаками полицентричности: на базе данных районов целесообразна организация субцентров.

– Уровень Б. Значение коэффициента полицентричности находится в диапазоне от 3 до 4 (районы: 2, 3, 7, 9, 10, 12, 15, 17, 20). Организация субцентров на базе данных районов возможна при выявлении дополнительных факторов, вли-

яющих на взаиморасположение территорий расселения и размещения рабочих мест.

– Уровень В. Значение коэффициента полицентричности менее 3 (районы: 4, 5, 6, 14, 18, 21). Потенциал полицентричности в данных районах недостаточен для организации субцентров.

Необходимо заметить, что территории, соотнесенные с уровнем А, являются главным образом периферийными и характеризуются низким уровнем транспортного обслуживания (исключение: район № 1). Территории, соотнесенные с уровнями Б и В, обладают в основном достаточным уровнем транспортного обслуживания. В то же время анализ картограммы ранжирования территорий не позволяет выделить четкий критерий отнесения районов к тому или иному уровню в соответствии с их положением в планировочной структуре города.

Выводы

1. Разработаны численные критерии определения потенциальных городских центров (субцентров) на основе анализа эластичности внутрирайонных корреспонденций в зависимости от величины средних затрат времени на передвижения.

2. Определены значения прироста населения, остающегося в своих районах исследования, для территории ядра Петербургской агломерации.

3. Введено понятие коэффициента полицентричности, определяемого как прирост населения, остающегося в своих районах исследования, при изменении средних затрат времени передвижения по городу.

4. Разработана градация районов по потенциалу полицентричности на основе значения коэффициента полицентричности.

Список источников

1. Якимов М. Р. Транспортное планирование: терминологический словарь / М. Р. Якимов. — М.: Агентство РАДАР, 2022. — 86 с.

2. Москва: курс на полицентричность. Оценка эффектов градостроительных проектов на полицентрическое развитие Москвы. — М.: НИУ ВШЭ, 2016. — 36 с.
3. Калужный Н. А. Выявление потенциальных городских центров на основе моделирования пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. А. Калужный, Л. А. Лосин, В. В. Солодилов // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 2(77). — С. 144–155.
4. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования (под ред. Б. Л. Овсевича) / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров. — Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1989. — 145 с.
5. Лосин Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач / Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2017. — С. 88–95.
6. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии. Сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.
7. Мягков В. Н. 55 лет лаборатории математического моделирования функционально-пространственного развития городов Ленинградского отделения ЦЭМИ — ЭМИ РАН — ИПРЭ РАН / В. Н. Мягков, Л. А. Лосин, Н. В. Булычева // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2024. — № 1(76). — С. 116–125.
8. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использование программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения (согласованы Минтрансом России 13.07.2017).
9. Булычева Н. В. Методы восстановления матриц межрайонных корреспонденций / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Региональная экономика и развитие территорий: сборник научных статей. — ФГБУН «Институт проблем региональной экономики», НИУ ВШЭ-СПб, 2018. — Т. 1(12). — С. 192–200.
10. Свердлин Л. И. Транспортные обоснования композиции генерального плана города / Л. И. Свердлин // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XI международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: АМБ, 2005. — С. 40–43.
11. Гутнов А. Э. Мир архитектуры. Лицо города / А. Э. Гутнов, В. Л. Глазычев. — М.: Молодая гвардия, 1990. — 350 с.
12. Булычева Н. В. Возможности досетевого подхода в транспортном планировании (на примере г. Перми) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов / Под научной редакцией д.э.н. С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2021. Вып. 49. — С. 4–11.
13. Лисененков А. И. Формирование расчетного графа на основе анализа транспортной системы городской агломерации / А. И. Лисененков, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов / Под научной редакцией д.э.н. С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2019. — Вып. 45. — С. 49–53.
14. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.
15. Булычева Н. В. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) / Н. В. Булычева, Д. В. Капский, Л. А. Лосин // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. — 2023. — Т. 59. — № 3. — С. 253–264.
16. Селиверстов Я. А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Научно-технические ведомости

Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2015. — № 2–3(217–222). — С. 49–70.

17. Шестеров Е. А. Актуальность научного наследия М. С. Фишелясона для решения задач транспортного планирования / Е. А. Шестеров, Н. А. Калюжный, Л. А. Лосин // Вестник гражданских инженеров. — СПбГАСУ, 2020. — Вып. 2(79). — С. 45–50.

18. Питтель Б. Г. Одна простейшая вероятностная модель коллективного поведения / Б. Г. Питтель // Проблемы передачи информации — 1967. — Т. 3. — Вып. 3. — С. 37–52.

19. Математические методы в управлении городскими транспортными системами (отв. ред. О. Г. Фаянс). — Л.: Наука, 1979. — 152 с.

20. Лисененков А. И. Транспортные тарифы и их влияние на предпочтения участников движения при выборе пути / А. И. Лисененков // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. — № 3(70). — С. 142–148.

21. Булычева Н. В. Моделирование матриц межрайонных грузовых корреспонденций на основе данных комплексного обследования передвижений на городской улично-дорожной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Региональная экономика и развитие территорий / Под

ред. Л. П. Совершаевой. — СПб.: ГУАП, 2020. — Вып. 1(14). — С. 240–247.

22. Лосин Л. А. Исследования пространственных закономерностей городского расселения / Л. А. Лосин // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Брест, 26–28 октября 2023 г.: в 2 ч. — Брест: БрГУ, 2023. — Ч. 1. — С. 17–21.

23. Лосин Л. А. Административно-территориальные преобразования и формирование локальных центров расселения на территории Санкт-Петербургской городской агломерации / Л. А. Лосин, В. В. Солодилов, Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2020. — № 2–3(61–62). — С. 33–46.

Дата поступления: 04.11.2024

Решение о публикации: 04.01.2025

Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук, зав. лабораторией; nipigrad@yandex.ru

КАЛЮЖНЫЙ Николай Анатольевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; nicholaskalyuzhny@gmail.com

Identifying Polycentric Urban Area Potential Based on Mathematical Modelling of Passenger Public Transport Systems

L. A. Losin^{1,2}, N. A. Kalyuzhny¹

¹Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya ul., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Losin L. A., Kalyuzhny N. A. Identifying Polycentric Urban Area Potential Based on Mathematical Modelling of Passenger Public Transport Systems // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 47–59. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-47-59

Summary

Purpose: To identify the potential application of transport and urban planning modelling methods to rationalize sub-centre locations within a polycentric model of urban development. To present numeric criteria for

the potential urban centre locations depending on the average travel time as well as to develop a district grading system based on these criteria. To estimate the population growth rate in the city residential districts with increasing average travel time on the example of St. Petersburg agglomeration. To rank the investigated residential districts in terms of their sub-centre organizational efficiency. **Methods:** Mathematical modelling, large volume data processing methods, geo-information analysis methods. **Results:** The methods used in modern transport models for calculating zone-to-zone matrices have been analyzed. A hypothesis is proposed to determine the level of urban areas' self-sufficiency for creating sub-centres within them. Numerical criteria for the potential urban centre placement depending on the average travel time have been developed, and a district ranking system based on these criteria is proposed. The solution of the problem of determining the feasibility of sub-centres within a city has been tested on the example of St. Petersburg agglomeration. The conclusions on the possibility of using mathematical modelling methods to justify the sub-centre placement in cities and agglomerations based on the proposed numerical criteria are formulated. **Practical significance:** The results obtained can be used for expanding the range of project solutions applying methods of transport and urban planning modelling. The developed approaches and criteria can be used in the design solutions as part of city area development strategies and concepts in terms of substantiating the possibility of organizing a polycentric model.

Keywords: Transport modelling, agglomeration, polycentric model, zone-to-zone matrices, transport demand, entropy maximization.

References

1. Yakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: terminologicheski slovar* [Transport planning: a terminological dictionary]. Moscow: Agentstvo Radar Publ., 2022, 86 p. (In Russian)
2. *Moskva: kurs na policentrichnost. Ocenka effektiv gradostroitelnykh proektov na policentricheskoe razvitiye Moskvy* [Moscow: a course on polycentricity. Assessment of the effects of urban development projects on the polycentric development of Moscow]. Moscow: HSE Publ., 2016, 36 p. (In Russian)
3. Kalyuzny N. A., Losin L. A., Solodilov V. V. *Vyyavlenie potencialnykh gorodskikh centrov na osnove modelirovaniya passazhiropotokov (na primere Sankt-Peterburga)* [Identification of potential urban centers based on passenger traffic modeling (on the example of St. Petersburg)]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2024, Iss. 2(77), pp. 144–155. (In Russian)
4. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitel'nogo proektirovaniya (pod red. B.L. Ovsievicha)* [Mathematical support of urban planning (under general editorship of B.L. Ovsievich)]. L.: Nauka, Leningradskoe otdeleniye Publ., 1989, 145 p. (In Russian)
5. Losin L. A. *Peterburgskiy opyt postroeniya informacionno-programmnogo kompleksa dlya resheniya transportno-gradostroitelnykh zadach* [Designing of software complex for the solving of transport and urban problems in St. Petersburg]. *Sotsialno-ekonomicheskie problemy razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Minsk: BNTU Publ., 2017, pp.88–95. (In Russian).
6. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informacionnye tehnologii* [Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies]. *Sbornik trudov Sankt-Peterburgskogo ekonomiko-matematicheskogo instituta RAN. № 9. Matematicheskie modeli v issledovanii processov razvitiya gorodskoy sredy* [Proceedings of the St. Petersburg Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban environment development processes]. St. Petersburg: Nestor-istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)
7. Myagkov V. N., Losin L. A., Bulycheva N. V. *55 let laboratorii matematicheskogo modelirovaniya funktsional'no-prostranstvennogo razvitiya gorodov Leningradskogo otdeleniya TsEMI — EMI RAN — IPRE RAN* [55 years of the Laboratory of Mathematical Modeling of Functional and Spatial Development of Cities of the Leningrad Branch of

CEMI — EMI RAS — IPRE RAS]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development]. 2024, Iss. 1(76), pp. 116–125. (In Russian)

8. *Metodicheskie rekomendacii po razrabotke i realizacii meropriyatiy po organizacii dorozhnogo dvizheniya. Ispolzovanie programmnykh produktov matematicheskogo modelirovaniya transportnykh potokov pri ocenke effektivnosti proektnykh resheniy v sfere organizacii dorozhnogo dvizheniya* [Methodological recommendations for the development and implementation of measures for the organization of traffic. The use of software products for mathematical modeling of traffic flows in evaluating the effectiveness of design solutions in the field of traffic management]. Ministry of Transport, 13.07.2017 (In Russian)

9. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Metody vosstanovleniya matrits mezhrayonnykh korrespondentsiy* [Methods for restoring interdistrict correspondence matrices]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territoriy: sbornik nauchnykh statey* [Regional economy and development of territories: collection of scientific articles]. FGBUN "Institut problem regional'noy ekonomiki", NIU VShE-SPb, 2018, vol. 1(12), pp. 192–200. (In Russian)

10. Sverdlin L. I. *Transportnye obosnovaniya kompozicii generalnogo plana goroda* [Transport substantiation of the composition of the city master plan]. *Socialno-ekonomicheskie problem razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Yekaterinburg, AMB Publ., 2005, pp. 40–43 (In Russian)

11. Gutnov A. E., Glazychev V. L. *Mir arhitektury. Litso goroda* [The world of architecture. The face of the city]. Moscow: Molodaya Gvardiya Publ., 1990, 350 p. (In Russian)

12. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Vozможности dosetevogo podhoda v transportnom planirovanii (na primere Permi)*. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova [The possibilities of a pre-network approach in transport planning (on the example of Perm)]. *Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh socialno-ekonomicheskikh sistem:*

sbornik nauchnykh trudov. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems. Under general editorship of prof. S.V. Kuznetsov]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2021, vol. 49, pp. 4–11. (In Russian)

13. Lisenenkov A. I., Losin L. A. *Formirovanie raschetnogo grafa na osnove analiza transportnoy sistemy gorodskoy aglomeracii. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova* [Creation of a calculated graph based on the analysis of the agglomeration transport system]. *Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh socialno-ekonomicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov. Pod nauchnoy redaktsiyey d.e.n. S. V. Kuznetsova* [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems. Under general editorship of prof. S. V. Kuznetsov]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2019, pp. 49–53. (In Russian)

14. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov. Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie. Ch. 1: Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning. Transport planning: mathematical modeling. Part 1: Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: BNTU Publ., 2019, 94 p. (In Russian)

15. Bulycheva N. V., Kapski D. V., Losin L. A. *Issledovanie vliyaniya parametrov transportnoi modeli na rezultaty raschetov passazhiropotokov (na primere Sankt-Peterburga)* [Studying the influence of transport model parameters on the results of passenger traffic calculations (on the example of St. Petersburg)]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Proceedings of National Academy of sciences of Belarus. Physics and Mathematics series]. 2023, vol. 59, Iss. 3, pp. 253–264. (In Russian)

16. Seliverstov Ya. A., Seliverstov S. A. *Metody i modeli postroeniya matric transportnykh korrespondentsiy* [Methods and models of the construction of transport correspondence matrix]. *Nauchno-tekhnicheskije vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnical University. Computer science. Telecom-

munications. Management]. 2015, Iss. 2–3(217–222), pp. 49–70. (In Russian)

17. Shestеров E. A., Kalyuzhny N. A., Losin L. A. Aktualnost nauchnogo naslediya M. S. Fishelsona dlya resheniya zadach transportnogo planirovaniya [The Relevance of the scientific heritage of M. S. Fishelson for solving problems of transport planning]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. SPbGASU Publ., 2020, vol. 2(79), pp. 45–50 (In Russian)

18. Pittel B. G. Odnа prostеishaya veroyatnostnaya model kollektivnogo povedeniya [One simple probabilistic model of collective behavior]. *Problemy peredachi informacii* [Problems of information transmission]. 1967, vol. 3, Iss. 3, pp. 37–52. (In Russian)

19. *Matematicheskie metody v upravlenii gorodskimi transportnymi sistemami (otv. red. O. G. Fayans)* [Mathematical methods in the management of urban transport systems (under editorship of O. G. Fayans)]. Leningrad: Nauka Publ., 1979, 152 p. (In Russian)

20. Lisenenkov A. I. Transportnye tarify i ih vliyanie na predpochteniya uchastnikov dvizheniya pri vybore puti [Transport tariffs and their impact on the preferences of road users when choosing a route]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2022, Iss. 3(70), pp. 142–148. (In Russian)

21. Bulycheva N. V., Losin L. A. Modelirovanie matric mezhrayonnykh gruzovykh korrespondenciy na jsnove danykh kompleksnogo obsledovaniya peredvizheniy na gorodskoi ulichno-dorozhnoi seti [Modeling of cargo correspondence matrices on the basis of complex survey data of the

urban road network traffic]. *Regional'naya ekonomika i razvitie territoriy* [Regional economy and territorial development]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2020, Iss. 1(14), pp. 240–247. (In Russian)

22. Losin L. A. Issledovaniya prostranstvennykh zakonov mernostei gorodskogo rasseleniya [Studies of spatial patterns of urban settlement]. *Aktual'nye problemy nauk o Zemle: issledovaniya transgranichnykh regionov: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of Earth sciences: studies of cross-border regions]. Brest: Brest State University Publ., 2023, part 1, pp. 17–21. (In Russian)

23. Losin L. A., Solodilov V. V., Lyapunova G. P. Administrativno-territorialnye preobrazovaniya i formirovanie lokalnykh centrov rasseleniya na territorii Sankt-Petersburgskoi gorodskoi aglomeracii [Administrative transformations and generation of settlement local centers on the territory of the St. Petersburg urban agglomeration]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2020, Iss. 2–3(61–62), pp. 33–46. (In Russian)

Received: November 04, 2025

Accepted: January 04, 2025

Author's information:

Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering, Laboratory Head; nipigrad@yandex.ru

Nikolai A. KALYUZHNY — PhD in Engineering, Senior Researcher; nicholaskalyuzhny@gmail.com

УДК 656.2:519.868

Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка

Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Мамаев Э. А., Чеботарева Е. А. Математическая модель организации эксплуатационной работы в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 60–74. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-60-74

Аннотация

Цель: Формализация эксплуатационной работы железнодорожного участка для представления в имитационных и цифровых моделях управления в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка. **Методы:** Методической основой исследования является системный подход, при котором объект исследования рассматривается как сложная система, состоящая из взаимодействующих подсистем и элементов. Используются методы динамического и нейросетевого программирования, а также инструментарий для структурного анализа, алгоритмизации и моделирования сложных систем управления. **Результаты:** В исследовании представлены основные сущности, имеющие отношение к организации работы железнодорожного участка, их состояния, алгоритмы взаимного влияния, а также параметры оценки эффективности управления. Выполнена формализация иерархии идентификационных параметров участка железнодорожной сети и объектов, находящихся на ней, для формирования цифрового двойника и нейросетевых процедур управления. Предложен подход к выработке организационно-технологических решений, направленных на эффективное использование пропускных способностей участков и направлений полигона сети с применением технологий цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта. **Практическая значимость:** Представлены индикаторы разных уровней организации работы участка железнодорожной сети, состояния объектов транспортной инфраструктуры и поездной ситуации на участке, влияющие на пропускную способность участка. Формализация объектов и процессов железнодорожного транспорта имеет значение для последующих исследований в области технологий искусственного интеллекта, для разработки и внедрения интеллектуальных технологий управления перевозочным процессом. Апробация предложенной модели выполняется на базе учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» с целью отработки опыта использования искусственного интеллекта в задачах управления перевозочным процессом.

Ключевые слова: Железнодорожный участок, пропускная способность, математическая модель, цифровая модель, нейросетевое управление.

Введение

Одним из качественных индикаторов мощности железнодорожного транспорта является показатель пропускной способности [1], определяемый для участков сети. Оценка пропускной

способности железнодорожного участка имеет важное значение для планирования эксплуатационной работы не только для перевозчика, но и для грузоотправителей, которые в качестве основного критерия качества перевозки выдвигают выпол-

нение сроков доставки. Безусловно, железнодорожный перевозчик — ОАО «РЖД» стремится максимально завершить логистический процесс организации перевозки с выполнением договорных обязательств [2].

В то же время следует подчеркнуть, что грузопоток, находящийся в системе железнодорожных перевозок, является в определенном смысле «незавершенным производством». С экономической точки зрения для производственных предприятий увеличение объема незавершенного производства, при прочих равных условиях, является скорее негативным фактом, поскольку увеличивается время оборота. С другой стороны, незавершенное производство — это объем работы, который обеспечивает производительную загрузку объектов транспорта. Такое двойное отношение к грузовой базе железнодорожного транспорта приводит к необходимости выполнения сверхнормативных планов по погрузке, т. е. формированию незавершенного производства для дополнительного грузопотока. Стремление улучшить объемные показатели работы железнодорожного транспорта приводит к завышению рабочего парка вагонов на станции, что снижает их маневренность, требует дополнительных мероприятий по усилению пропускной способности участков и направлений. Данный негативный контекст к выполнению «планов погрузки» ни в коей мере не требует отказа от данного показателя, а подчеркивает необходимость более взвешенного подхода к планам отгрузки с учетом производственной (транспортной) ситуации [3, 4].

Управление железнодорожной инфраструктурой и перевозочным процессом на современном этапе носит характер «управление по состоянию» в силу следующих причин [5–8]:

- используемая инфраструктура и резервы на транспорте не могут быть усилены за короткий промежуток времени в силу их высокой капиталоемкости;

- сезонные и эпизодически проявляющиеся внешние факторы вносят достаточные возмущения в систему планирования и нормирования перевозочного процесса, что предопределяет высокую значимость операционных управленческих решений;

- системообразующий характер железнодорожного транспорта для экономики и отечественной транспортной системы привел сегодня к высокой загрузке основных направлений, а колебания объемов перевозок на этих участках приводят к существенным потерям компании ОАО «РЖД» в виде эксплуатационных расходов, претензионных выплат за просрочки в доставке порожних и грузовых отправок;

- существенные изменения в структуре грузопотоков в направлении к крупным потребителям, морским портам приводят к формированию грузонапряженных участков, требующих высоких компетенций операционного менеджмента (диспетчерского персонала) компании по управлению и регулированию перевозочным процессом.

Эти и другие факторы повышают зависимость эффективности управления от компетенций диспетчерского персонала. Современные концепции перехода к цифровым платформам управления предусматривают создание интеллектуальных помощников диспетчерского аппарата, полностью или частично замещающих определенные функции или операции. В этой области находятся технологии формирования цифровых двойников объектов железнодорожной инфраструктуры и нейросетевых алгоритмов управления перевозочным процессом [9–14].

При всей концептуальной простоте постановки таких задач перевод их в систему управления железнодорожным транспортом представляет большую сложность, связанные с процессами формализации состояния объектов, перехода их из одного состояния в другое, оценки эффективности состояния и (или) решения, их результативности и другими факторами. В исследовании



Рис. 1. Иерархия индикаторов для оценки пропускной способности железнодорожного участка

представлена формализация иерархии идентификационных параметров участка железнодорожной сети и объектов, находящихся на ней для формирования цифрового двойника и нейросетевых процедур управления [15–19].

Постановка задачи

Формализация процедур оценки пропускной способности участка железнодорожной сети опирается на следующие ключевые положения:

- пропускная способность зависит от параметров инфраструктуры и технико-эксплуатационной характеристики железнодорожного участка, активно влияющих на систему организации перевозочного процесса (число главных путей, количество станционных и приемоотправочных путей; вид тяги, серии локомотивов, весовые нормы и длина составов; средства связи по движению поездов, профиль железнодорожного пути и его

элементов; надежность работы устройств и др.). К параметрам инфраструктуры, которые не влияют непосредственно на пропускную способность участка, можно отнести объекты обслуживания подвижного состава, технологические процессы, не связанные с поездной работой (погрузка, выгрузка, отцепочный ремонт, экипировка и др.), а также надежность их функционирования;

- пропускная способность зависит от типа графика и от значений его исходных и расчетных элементов (перегонных времен хода, станционных интервалов и интервалов между поездами), технологии организации движения (применение технологии подталкивания, виртуальной сцепки, организация соединенных поездов и др.);

- пропускная способность зависит от структуры поездопотока (грузовое, пассажирское, пригородное, скоростное), их долей в объеме движения и направлений, парности размеров движения и др.;

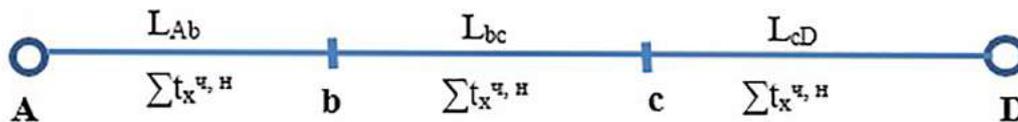


Рис. 2. Схема участка A — D

– пропускная способность зависит от принятых способов усиления пропускной способности, причем принимается вариант организации поездопотоков с «максимально» возможным графиковым пропуском;

– пропускная способность учитывает необходимость резервирования времени на выполнение технологических операций по текущему содержанию объектов инфраструктуры, а также резерва времени для пропуска поездов специального назначения;

– пропускная способность рассчитывается с учетом перерабатывающих способностей станций, входящих в участок.

Иерархия индикаторов для оценки пропускной способности железнодорожного участка в соответствии с Методикой [1] имеет вид, представленный на рис. 1.

В соответствии с Методикой [1] в общем виде пропускная способность перегона будет определяться по обобщенной формуле:

$$N = \frac{T_{\text{пол}}}{T_{\text{пер}}},$$

где $T_{\text{пол}}$ — «полезное время» в сутках, используемое для движения поездов по участку;

$T_{\text{пер}}$ — период графика.

Под периодом графика понимается время занятия перегона характерной для данного графика группой поездов, периодически чередующихся в течение суток, т. е. пропускная способность обратно пропорциональна периоду графика.

Алгоритм определения пропускной способности на однопутных и двухпутных участках имеет отличия. Так, на однопутном участке определяется максимальный или ограничивающий перегон (имеющей максимальное суммарное время движения поездов с учетом схемы движения (графика), для которого выбирается схема прокладки поездов, обеспечивающая наименьший период графика. Например, для однопутного участка A — D с промежуточными пунктами b, c определение пропускной способности участка производится по ограничивающему перегону, определенному с учетом наибольшего суммарного времени движения пары поездов из всех перегонов (A — b, b — c, c — D), рис. 2.

На двухпутном участке пропускная способность будет зависеть от межпоездного интервала и других определенных параметров [1].

Время $T_{\text{пол}}$ определяется с учетом параметров участка, продолжительности «окон», надежности объектов инфраструктуры, табл. 1 [1].

На время пропуска поезда в графике движения влияют еще потери времени, связанные с дополни-

Таблица 1. Параметры железнодорожного участка, влияющие на $T_{\text{пол}}$

Путность участка	Тип тяги	Выполнение плановых работ, $t_{\text{тех}}$	Коэффициент надежности технических средств $\alpha_{\text{н}}$
Однопутный	Электрифицированный	75	0,93
	Неэлектрифицированный		0,92
Однопутный с двухпутными вставками	Электрифицированный	90	0,95
	Неэлектрифицированный		0,94
Двухпутный	Электрифицированный	150	0,94
	Неэлектрифицированный		0,95

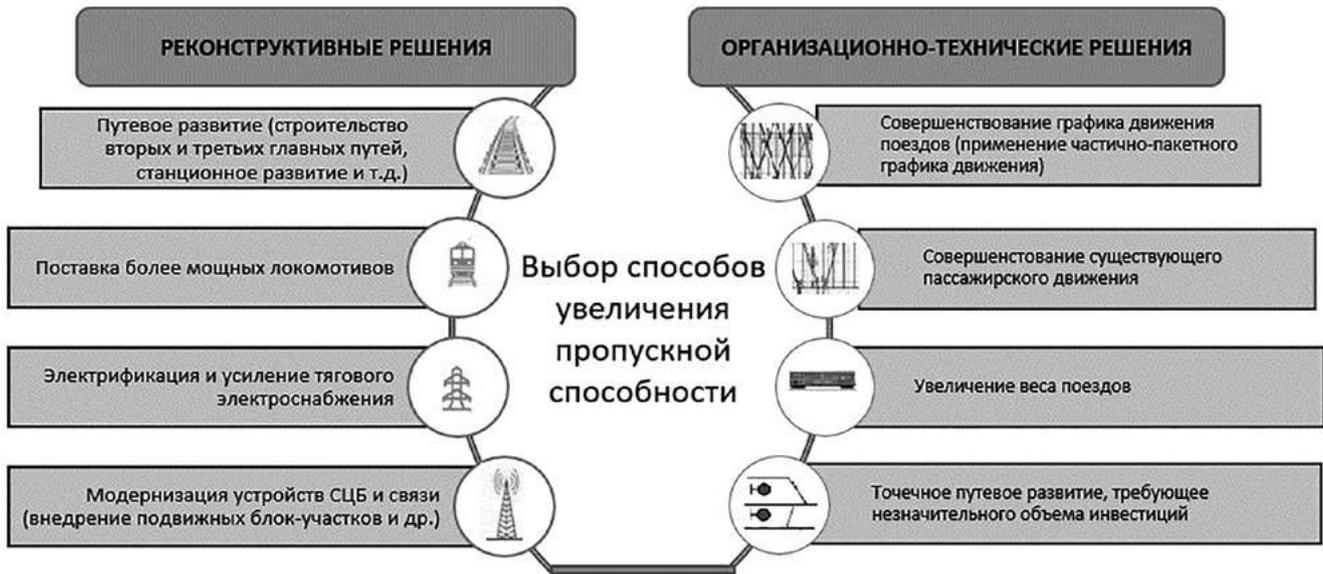


Рис. 3. Способы увеличения пропускной способности участков [20]

тельными операциями, обусловленные требованиями безопасности (станционными интервалами), предусмотренные схемой пропуска поездов.

Эти и другие факторы формируют параметрическое пространство организации движения поездов на участке и станции, которые позволяют рассчитать аналитически параметры пропускной способности участка при условии соблюдения всех регламентов и нормативов, имеющих отношение не только к перевозочному процессу, но и технологии взаимодействия с контрагентами перевозочной компании.

На железных дорогах для усиления пропускной способности направлений применяют реконструктивные и организационно-технические мероприятия (рис. 3). Организационно-технические решения являются основным фактором повышения пропускной способности, не требуют значительных инвестиций. Такие мероприятия могут быть применимы для оперативного повышения пропускной способности до момента реализации проектов по комплексному развитию железнодорожной инфраструктуры, которая требует значительного объема инвестиций и реализации в долгосрочном периоде.

Отметим, что формирование многопараметрической задачи оптимального управления динамическими процессами для оперативного повышения пропускной способности сводятся к поиску локальных оптимальных решений по ускорению пропуска поездопотока по участку за счет управляющего воздействия на параметры пропуска поездопотока, который соответствует принципу оптимальности динамического программирования: оптимальное решение (траектория движения) включает только оптимальные решения каждого этапа или интервала принятия решения (оптимальные траектории между любыми двумя «точками»).

Элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на железнодорожном участке

Учитывая этот принцип, рассмотрим формализованную модель организации движения поездов на участке без предварительной привязки к индикаторам и параметрам железнодорожного участка, представленную на рис. 1 и в табл. 1.

В организации перевозочного процесса участвуют три стороны:

1. Железнодорожная инфраструктура (ЖИ), на которой обеспечивается движение «поездной группы».

2. Объект управления — «поездная группа» (ПГ), которая находится в состоянии покоя или движения.

3. Руководящее, регулирующее решение в лице «поездного диспетчера» (ДНЦ), который может разрешить/запретить конкретные изменения — переходы системы из одного состояния в другое исходя из набора определенных регулировочных мероприятий ($R_1 \dots R_n$).

Множество состояний элементов «инфраструктуры» участка обозначим множеством:

$$S(t) = \{S_l^{-1}(t), S_l^0(t), S_l^1(t)\},$$

где t — момент времени (наблюдения, управления);

$l = 1, 2, 3, \dots, L$ — элементарные участки (блоки) инфраструктуры, которые влияют на организацию перевозочного процесса;

$S_l^{-1}(t)$ — находится в процессе восстановления в результате отказа технических устройств или иной причины;

$S_l^0(t)$ — находится в состоянии готовности к работе (ожидания);

$S_l^1(t)$ — находится в состоянии активной загрузки (пропуска «поездной группы»).

Множество состояний ПГ на участке обозначим множеством:

$$P(t) = \{P_{l_1 l_2}^1(t, l), P_{l_1 l_2}^0(t, l)\},$$

где $l_1(l_2)$ — начальная (конечная) станция ПГ;

$P_{l_1 l_2}^1(t, l)$ — находится в состоянии движения (изменения состояния) на блоке l ;

$P_{l_1 l_2}^0(t, l)$ — находится в состоянии ожидания команды и (или) изменения состояния в смежном участке.

Модель активного управления поездной работой на участке задается множеством решений «диспетчера»:

$$D(t) = \{D_l(t), D_{l_1 l_2}(t), d_{l_1 l_2}(t)\},$$

где $D_l(t)$ — переключатель состояния блока участка в режиме включено/выключено;

$D_{l_1 l_2}(t)$ — переключатель состояния «поездной группы» в режиме включено/выключено;

$d_{l_1 l_2}(t)$ — переключатель «скорости» изменения состояния «поездной группы» (изменение времени запаздывания смены состояний «поездной группы»).

«Генерация ПГ» может происходить по заданному графику поездообразования на границах участка, а именно:

– для каждой станции (участка) $a \in [1, L]$ и момента времени определены $P_{a,j}^1(t, a)$ — поезд, отправляемый со станции (блока) a назначением на станцию (блок) j в соответствии с утвержденным графиком движения.

Совокупность решений по генерации поездных групп обозначим $\xi(t)$.

Динамическая поездная модель на железнодорожном участке описывается множествами

$$\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}.$$

Все параметры принимают значения 0 (свободен, в ожидании) или 1 (занят, в работе) в зависимости от состояния объекта или процесса.

Цель моделирования — оценить (достичь) максимальную пропускную способность участка железной дороги для реализации формируемых поездопотоков $\xi(t)$ на основе выбора управленческих решений $D(t)$, для реализации поездопотоков $P(t)$ с использованием возможностей (состояний) объектов инфраструктуры $S(t)$.

Указанные элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на участке сведем в табл. 2.

Формализованная модель управления перевозочным процессом

Изменение состояний сущностей за единицу тактового времени Δt определяет регламентированный перевозочный процесс. Моменты

Таблица 2. Элементы (сущности) формализованной модели организации движения поездов на участке

Представление	Состояния	Описание состояния	Множество состояний
Железнодорожная инфраструктура (ЖИ)			
Последовательные блоки (участки) $l = 1, 2, \dots, L$	$S_l^{-1}(t)$	Находится в процессе восстановления в результате отказа технических устройств или иной причины	$S(t) = \left\{ \begin{matrix} S_l^{-1}(t), S_l^0(t), \\ S_l^1(t) \end{matrix} \right\}$
	$S_l^0(t)$	Находится в состоянии готовности к работе (ожидания)	
	$S_l^1(t)$	Находится в состоянии активной загрузки (пропуска «поездной группы»)	
«Поездная группа» (ПГ)			
Поезд, локомотив с совокупностью признаков (вес, длина, категория и др.)	$P_{l/l_2}^1(t, l)$	Находится в состоянии движения (изменения состояния) на блоке l	$P(t) = \left\{ \begin{matrix} P_{l/l_2}^1(t, l), \\ P_{l/l_2}^0(t, l) \end{matrix} \right\}$
	$P_{l/l_2}^0(t, l)$	Находится в состоянии ожидания команды и (или) изменения состояния на данном или смежном участке	
«Поездной диспетчер» (ДНЦ)			
ДНЦ данного или смежного участка	$D_l(t)$	Ввод состояния «инфраструктуры» в режим включено/выключено	$D(t) = \left\{ \begin{matrix} D_l(t), \\ D_{l/l_2}(t), d_{l/l_2}(t) \end{matrix} \right\}$
	$D_{l/l_2}(t)$	Ввод состояния «поездной группы» в режим остановка/движение	
	$d_{l/l_2}(t)$	Корректировка «скорости» изменения состояния «поездной группы» в соответствии с принятым регулировочным мероприятием ($R_1 \dots R_n$)	

времени, в которых может происходить смена состояний, определим через t_i , $i = 0, 1, 2, \dots, I$ для периода планирования $[0; T]$, где $T = \Delta t I$. Смена состояний сущностей может определяться следующими соотношениями.

Состояния «инфраструктуры». Участок открывается для работы после «переключения» его «диспетчером», т. е.

$$S_l^{-1}(t_i) = 1 - S_l^{-1}(t_{i-1})D_i(t_i). \quad (1)$$

В общем виде с позиций динамического программирования (без учета конкретных средств связи по движению поездов) участок (элемент участка) остается в состоянии ожидания работы, если не было ПГ в предшествующем участке (элементе) или при нахождении в предшествующем участке (элементе) «диспетчер» не открыл движения, т. е.

$$S_l^0(t_i) = (1 - P_{l/l_2}^{-1}(t_{i-1}, l-1))D_{l/l_2}(t_i) + P_{l/l_2}^0(t_{i-1}, l-1)(1 - D_{l/l_2}(t_i)). \quad (2)$$

На предшествующем участке находится ПГ, и «диспетчер» не остановил движение или ожидающему движению на предыдущем участке поезду «диспетчер» разрешил движение, т. е.

$$S_l^1(t_i) = P_{l/l_2}^1(t_{i-1}, l-1)(1 - D_{l/l_2}(t_i)) + P_{l/l_2}^0(t_{i-1}, l-1)D_{l/l_2}(t_i). \quad (3)$$

Состояния ПГ. ПГ находится в состоянии движения, если следующий участок свободен, не было «команды» диспетчера на ее остановку и следующий участок «свободен», т. е.

$$P_{l/l_2}^1(t_i, l) = P_{l/l_2}^1(t_{i-1}, l-1) \times (1 - D_{l/l_2}(t_i))(1 - S_l^0(t_i)). \quad (4)$$

ПГ находится в состоянии ожидания движения, если следующий участок свободен, не было «команды» диспетчера на ее движение или следующая по участку *ПГ* была остановлена «диспетчером», т. е.

$$P_{l_1 l_2}^0(t_i, l) = P_{l_1 l_2}^0(t_i, l-1)(1 - D_{l_1 l_2}(t_i)) + P_{l_1 l_2}^0(t_i, l-1)D_{l_1 l_2}(t_i). \quad (5)$$

Состояния «инфраструктуры» и «устройств». Известно, что действия диспетчера связаны с анализом поездной ситуации, состояния инфраструктуры и железнодорожных устройств на соответствующих «участках» и «поездных группах». Диспетчер изменит характер движения, если обнаруживается определенный «отказ», приводящий к технологическому нарушению в организации движения поездов.

Рассмотрим поток отказов такого рода как случайные параметры внешних воздействий на движение:

$$f_l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{на участке } l \text{ возник отказ;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{l_1 l_2}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{в } ПГ(l_1 l_2) \text{ возник отказ;} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (7)$$

Процесс восстановления после отказа инфраструктуры и *ПГ* будем считать случайным. Определим для инфраструктуры:

$$h_l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{устранен отказ на } l; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (8)$$

Аналогичная функция для *ПГ* имеет вид:

$$h_{l_1 l_2}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & \text{устранен отказ в } ПГ(l_1 l_2); \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (9)$$

Не останавливаясь на вероятностных характеристиках случайных процессов возникновения отказов и их восстановления, перейдем к решениям диспетчера по управлению движением на участке. Изменение состояния инфраструктуры (участка) при отказе по команде диспетчера, т. е.

$$D_l(t_i) = (1 - f_l(t_i)). \quad (10)$$

Изменение состояния *ПГ* при отказе по команде диспетчера, т. е.

$$D_{l_1 l_2}(t) = (1 - f_{l_1 l_2}(t)). \quad (11)$$

Изменение состояния инфраструктуры (участка) при восстановлении его работоспособности по команде диспетчера:

$$D_l(t) = h_l(t). \quad (12)$$

Изменение состояния *ПГ* при восстановлении его работоспособности по команде диспетчера:

$$D_{l_1 l_2}(t) = h_{l_1 l_2}(t). \quad (13)$$

Для каждой *ПГ* определена $k_{l_1 l_2}$ (длина *ПГ* в участках). Для каждой *ПГ* существует $b_{l_1 l_2}$ такой, что

$$\prod_{b=b_{l_1 l_2}}^{b_{l_1 l_2} + k_{l_1 l_2}} P_{l_1 l_2}^1(t_i, b) = 1, \quad (14)$$

для любого $t_i \in [0; T]$

и

$$P_{l_1 l_2}^1(t_i, b) = 0, \text{ для } b \notin [b_{l_1 l_2}; b_{l_1 l_2} + k_{l_1 l_2}]. \quad (15)$$

Условия (14)–(15) определяют непрерывность *ПГ*.

Решения по обеспечению непрерывности $ПП$ достигаются проверкой изменений на каждом временном интервале Δt . Если изменения не нарушают условий (1)–(15), то соответствующие изменения состояния инфраструктуры и $ПП$ могут реализовываться, т. е. изменения состояния подтверждаются.

Цифровая модель и нейросетевое управление

Формализованное представление сложных систем является базисом для построения имитационных, цифровых моделей с целью повышения эффективности управления ими. В вышеприведенной формализации железнодорожного участка цифровая модель представляется вышеприведенными множествами $\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}$ состояний сущностей и переходов между ними во времени по регламентированным правилам. Модель состояния объекта управления представляется множествами $\{S(t), P(t)\}$ и соотношениями (1)–(5). Модель управления — $\{S(t), P(t), D(t), \xi(t)\}$ и соотношения (1)–(15).

Для нейросетевого программирования ключевыми элементами являются эталонные состояния динамически изменяющегося объекта — поездная ситуация на участке. В рамках представленной формализации модели железнодорожного участка следует указать «нормативные» интервалы изменения параметров поездной работы.

Процесс нейросетевого управления будет заключаться в выработке последовательности действий (решений) диспетчера по «улучшению» параметров поездной работы, которые могут двух видов:

1. Приведение параметров работы участка к экономически эффективному, т. е. выполнение нормативных эксплуатационных параметров работы участка. При этом объем выполненной работы не может достигать наибольшего значения в ущерб качеству «движения».

2. Обеспечение пропуска по участку максимального числа $ПП$ за единицу времени. При этом достигается максимальная «заполняемость» участка $ПП$, которая снижает показатели качества эксплуатационной работы. Снижение показателей эксплуатационной работы участка — увеличение эксплуатационных расходов является, вообще говоря, негативным решением.

Вопросы, связанные со сложными схемами организации движения $ПП$ на участке, также решаются заданием определенных правил изменения состояний, установленных в модели блоков и генерированными $ПП$, по сути, линеаризацией участков на всем протяжении маршрута следования $ПП$.

Существенным для дальнейших исследований остаются вопросы отказов устройств инфраструктуры и $ПП$, которые должны иметь расчлененный по типам отказов и восстановления характер, а также вопросы, связанные с организационно-технологической надежностью (ОН) элементов модели.

В качестве базы для проведения экспериментальных исследований предложено использование разработанной в Ростовском государственном университете путей сообщения цифровой модели участка железной дороги Высочино — Тимашевская в рамках действующего учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога». Предлагается архитектура системы управления железнодорожным участком, функциональная схема которой изображена на рис. 4.

Система управления имеет в своем составе детерминированные логические блоки, предназначенные для подготовки данных для искусственной нейронной сети (ИНС) — логический блок формирования признаков, а также для формирования команд на основании принятого ИНС решения.

Формирование многопараметрической задачи оптимального управления динамиче-

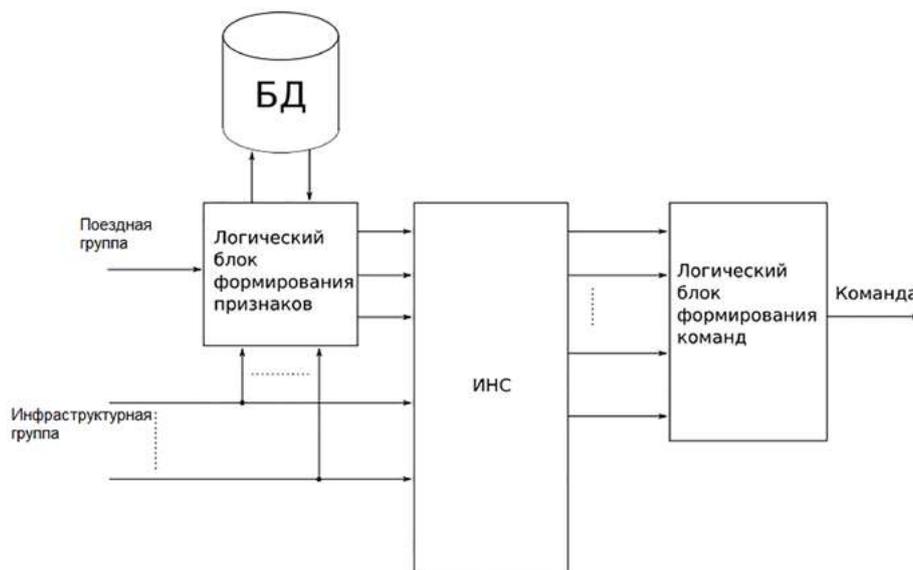


Рис. 4. Функциональная схема системы нейросетевого управления железнодорожным участком в режиме приема/пропуска поездов

скими процессами для оперативного повышения пропускной способности сводится к поиску локальных оптимальных решений по ускорению пропуска поездопотока по участку за счет управляющего воздействия на параметры пропуска поездопотока. Критичными в представленной формализованной модели остаются вопросы «привязки» сущностей к конкретному участку железной дороги, определения «особых» правил изменения состояний сущностей в зависимости от параметров эксплуатационной работы, приведенных в [1], определения критериев оценки («эталонных») состояний железнодорожного участка с позиций цифрового («нейросетевого») управления, а также допустимого множества управленческих решений со стороны «диспетчера». Эти и другие особенности формализации модели железнодорожного участка требуют конкретики в выборе участка и его характеристик.

Выводы

Разработка и интеграция технологий искусственного интеллекта становится одним из ключевых факторов развития в целом отраслей

и индустрий отечественной экономики. Отрасль железнодорожного транспорта и логистики является особенно значимой, так как она связана практически со всеми другими отраслями экономики. Железнодорожный транспорт обеспечивает лучшие возможности с точки зрения качества, стоимости, эффективности и безопасности по сравнению с другими видами транспорта. Поэтому внедрение эффективных решений на железнодорожном транспорте и в логистике может дать мультипликативный эффект для всей экономики в целом. Однако любые проекты по развитию технологий искусственного интеллекта непросто встраиваются в традиционные процессы и проекты цифровой трансформации, в том числе из-за сложности формализации процессов управления, в силу специфики их развития и использования. Данное исследование направлено на формализацию работы железнодорожного участка для представления в имитационных и цифровых моделях управления в задачах повышения пропускной способности железнодорожного участка. Предложен подход к выработке организационно-технологических решений, направленных на эффективное заполнение пропускных способностей

участков и направлений полигона сети с использованием технологий цифровых двойников и технологий искусственного интеллекта.

Список источников

1. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. — Утверждена приказом Минтранса России от 18 июля 2018 года № 266.

2. Мамаев Э. А. Логистика и транспорт в цифровой экономике / Э. А. Мамаев // Сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2018. — С. 8–12.

3. Багинова В. В. Цифровые технологии транспортного холдинга / В. В. Багинова, Б. А. Левин, Э. А. Мамаев // Логистика и управление цепями поставок. — 2021. — № 6(105). — С. 16–19.

4. Мамаев Э. А. Модели согласованного развития элементов логистических цепей / Э. А. Мамаев // Сб.: науч. Трудов «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017»). — Т. 2. Технические, экономические и юридические науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2017. — С. 160–162.

5. Мамаев Э. А. Цифровая логистика в смешанных перевозках в международном сообщении / Э. А. Мамаев // Сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике». — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т. путей сообщения. — 2019. — С. 243–248.

6. Белых А. А. Оценка влияния искусственного интеллекта на оперативное управление участковой железнодорожной станции / А. А. Белых, В. В. Широкова // Национальная Ассоциация Ученых. — 2020. — № 56-1(56). — С. 36–41. — DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.56.229.

7. Мамаев Э. А. Цифровизация транспортного бизнеса и развитие логистического сервиса для транспортного

холдинга с применением технологии BIGDATA / Э. А. Мамаев, М. В. Колесников // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): материалы XIV мультиконференции (Дивноморское, Геленджик, 27 сентября — 2 октября 2021 г.): в 4 т. Южный федеральный университет [редкол.: И. А. Каляев, В. Г. Пешехонов и др.]. — Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета. — 2021. — Т. 4. — С. 134–136.

8. Кузнецов В. Г. Формирование интегрированной технологии организации вагонопотоков и движения грузовых поездов в цифровой модели железной дороги / В. Г. Кузнецов, Е. А. Федоров, В. Г. Козлов // Интеллектуальные транспортные системы: мат-лы Междунар. научно-практ. конф. — М., 2022. — С. 204–214.

9. Рахмангулов А. Н. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных станций / А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкурин, Д. В. Александрин // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды междунар. научно-практ. конф., посвященной 125-летию университета. — М., 2021. — С. 574–582. — DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.76.

10. Москвичева Е. Е. К вопросу практической реализации цифровизации грузовых станций / Е. Е. Москвичева // Наука и образование транспорту. — 2022. — № 1. — С. 159–161.

11. Шабельников А. Н. Перспективы совершенствования КСАУ СП в рамках концепции цифровой железнодорожной станции / А. Н. Шабельников, Н. Н. Лябах // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). Труды седьмой научно-технической конф. — 2018. — С. 117–119.

12. Шилин А. О. Внедрение КСАУ СП в рамках концепции цифровой железнодорожной станции / А. О. Шилин // Вопросы науки. — 2022. — № 3. — С. 73–77.

13. Козлов П. А. О технологии расчета железнодорожных станций / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, А. О. Шмидт // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом: мат-лы Междунар. юбилейной научно-технической конф.,

посвященной 95-летию кафедр «Железнодорожные станции и транспортные узлы», «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте». — М., 2020. — С. 41–47.

14. Чеботарева Е. А. Моделирование элементов профессиональной интуиции в человеко-машинных системах для решения задач оперативного управления железнодорожным транспортом / Е. А. Чеботарева // Мир транспорта и технологических машин. — 2023. — № 3-4(82). — С. 61–69. — DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-61-69.

15. Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2021. — Т. 80. — № 2. — С. 91–99. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

16. Лычкина Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. — Казань, 2023. — С. 139–149.

17. Куртикова Э. Р. Применение нейронных сетей для классификации железнодорожных станций / Э. Р. Куртикова, Д. А. Шевченко, В. А. Карзаков // В сборнике: Кочневские чтения — 2023: современная теория

и практика эксплуатационной работы железных дорог. Труды II-й Междунар. научно-практ. конф. М., 2023. — С. 359–362.

18. Мишкuroв П. Н. Особенности построения агентной имитационной модели железнодорожной станции / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов // Современные проблемы транспортного комплекса России. — 2021. — Т. 11. — № 1. — С. 29–40. — DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40.

19. Ерофеев А. А. Технологии искусственного интеллекта при решении эксплуатационных задач в системе сменно-учетного планирования грузовой работы железнодорожных станций / А. А. Ерофеев // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. — 2022. — № 1(4). — С. 102–108.

20. Чеботарева Е. А. Анализ мероприятий по повышению пропускной способности участков Северо-Кавказской железной дороги / Е. А. Чеботарева. // Транспорт: наука, техника, управление. — 2022. — № 1. — С. 29–34. — DOI: 10.36535/0236-1914-2022-01-5.

Дата поступления: 20.10.2024

Решение о публикации: 05.12.2024

Контактная информация:

МАМАЕВ Энвер Агапашаевич — д-р техн. наук, проф.; mamaev_enver@mail.ru

ЧЕБОТАРЕВА Евгения Андреевна — канд. техн. наук, доц.; abrosimova@yandex.ru

Mathematical Model of the Railway Operation Optimization to Increase a Railway Section Capacity

E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Mamaev E. A., Chebotareva E. A. Mathematical Model of the Railway Operation Optimization to Increase a Railway Section Capacity // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 60–74. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-60-74

Summary

Purpose: Formalization of a railway section operation for simulation and digital operation models to improve a railway section capacity. **Methods:** The methodological basis of the research is a system approach in which the research object is considered as a complex system consisting of interacting subsystems and elements. Dynamic and neural network programming methods as well as tools for structural analysis, algorithmization and modeling of complex control systems are used. **Results:** The study presents the main entities related to the management of the railway section operation, their conditions, algorithms of mutual influence, as well as parameters for evaluating the management effectiveness. The formalization of the identification parameter hierarchy of a railway section and its infrastructure to create a digital double and neural network control procedures has been carried out. An approach to the development of operational and technological solutions aimed at the effective use of railway section capacities and network routes using digital doubles and artificial intelligence technologies is proposed. **Practical significance:** Indicators of different levels of railway section management, transport infrastructure and train operation on the section affecting the rail capacity are presented. Formalization of railway transport objects and processes will be important for further research in the field of artificial intelligence technologies as well as for the development and implementation of intelligent technologies in transportation management. Approbation of the proposed model has been carried out based on the ‘Virtual railway’ training laboratory complex in order to improve practical skills in applying artificial intelligence in the transportation management.

Keywords: Railway section, throughput, mathematical model, digital model, neural network control.

References

1. *Metodika opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zhelezнодорожного транспорта obshchego pol'zovaniya. Uverzhdena prikazom Mintransa Rossii ot 18 iyulya 2018 goda № 266* [Methodology for determining the throughput and carrying capacity of public rail transport infrastructure. Approved by the order of the Ministry of Transport of Russia dated July 18, 2018 № 266]. (In Russian)
2. Mamaev E. A. Logistika i transport v tsifrovoy ekonomike [Logistics and transport in the digital economy]. *Sb. nauch. tr. II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Transport i logistika: innovatsionnaya infrastruktura, intellektual'nye i resursosberegayushchie tekhnologii, ekonomika i upravlenie"* [Coll. sci. t. of the II int. scientific-practical. conf. "Transport and logistics: innovative infrastructure, intelligent and resource-saving technologies, economics and management"]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2018, pp. 8–12. (In Russian)
3. Baginova V. V., Levin B. A., Mamaev E. A. Tsifrovye tekhnologii transportnogo kholdinga [Digital technologies of the transport holding]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2021, Iss. 6(105), pp. 16–19. (In Russian)
4. Mamaev E. A. Modeli soglasovannogo razvitiya elementov logisticheskikh tsepy [Models of coordinated development of elements of logistics chains]. *Sb.: nauch. Trudov "Sovremennoe razvitie nauki i tekhniki" ("Nauka-2017"). T. 2. Tekhnicheskie, ekonomicheskie i yuridicheskie nauki Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya* [Coll.: scientific. Works "Modern development of science and technology ("Science-2017"). Vol. 2. Technical, economic and legal sciences]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2017, pp. 160–162. (In Russian)
5. Mamaev E. A. Tsifrovaya logistika v smeshannykh perevozkakh v mezhdunarodnom soobshchenii [Digital logistics in multimodal transportation in international traffic]. *Sb. nauch. tr. III mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Transport i logistika: strategicheskie priority, tekhnologicheskije platformy i resheniya v globalizovannoy tsifrovoy ekonomike"* [Coll. of scientific. works of the III international. scientific and practical. conf. "Transport and logistics: strategic priorities, technological platforms and solutions in the

globalized digital economy”]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t. putey soobshcheniya Publ., 2019, pp. 243–248. (In Russian)

6. Belykh A. A., Shirokova V. V. Otsenka vliyaniya iskusstvennogo intellekta na operativnoe upravlenie uchastkovoy zheleznodorozhnoy stantsii [Assessment of the impact of artificial intelligence on the operational management of a district railway station]. *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists]. 2020, Iss. 56-1 (56), pp. 36–41. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2020.1.56.229. (In Russian)

7. Mamaev E. A., Kolesnikov M. V. Tsifrovizatsiya transportnogo biznesa i razvitie logisticheskogo servisa dlya transportnogo kholdinga s primeneniem tekhnologii BIGDATA [Digitalization of the transport business and development of logistics services for a transport holding using BIGDATA technology]. *XIV Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2021): materialy XIV mul'tikonferentsii (Divnomorskoe, Gelendzhik, 27 sentyabrya — 2 oktyabrya 2021 g.): v 4 t. Yuzhnyy federal'nyy universitet (redkol.: I. A. Kalyaev, V. G. Peshekhonov i dr.)* [XIV All-Russian Multi-Conference on Management Problems (MKPU-2021): Proceedings of the XIV Multi-Conference (Divnomorskoye, Gelendzhik, September 27 — October 2, 2021): in 4 volumes. Southern Federal University (editorial board: I. A. Kalyaev, V. G. Peshekhonov et al.)]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta Publ., 2021, vol. 4, pp. 134–136. (In Russian)

8. Kuznetsov V. G., Fedorov E. A., Kozlov V. G. Formirovanie integrirovannoy tekhnologii organizatsii vagonopotokov i dvizheniya gruzovykh poezdov v tsifrovoy modeli zheleznoy dorogi [Formation of an integrated technology for organizing car flows and freight train traffic in a digital railway model]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: mat-ly Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [Intelligent transport systems: proc. Int. scientific-practical. conf.]. Moscow, 2022, pp. 204–214. (In Russian)

9. Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Imitatsionnye modeli v tsifrovyykh dvoynikakh zheleznodorozhnykh stantsiy [Simulation models in digital twins of railway stations]. *Akademik Vladimir Nikolaevich*

Obraztsov — osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy mezhdunar. nauchno-prakt. konf., posvyashchennoy 125-letiyu universiteta [Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — the founder of transport science: proc. Int. scientific-practical. conf., dedicated to the 125th anniversary of the university]. Moscow, 2021, pp. 574–582. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.76. (In Russian)

10. Moskvicheva E. E. K voprosu prakticheskoy realizatsii tsifrovizatsii gruzovykh stantsiy [On the issue of practical implementation of digitalization of freight stations]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education in transport]. 2022, Iss. 1, pp. 159–161. (In Russian)

11. Shabelnikov A. N., Lyabakh N. N. Perspektivy sovershenstvovaniya KSAU SP v ramkakh kontseptsii tsifrovoy zheleznodorozhnoy stantsii [Prospects for improving the KSAU SP within the framework of the concept of a digital railway station]. *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2018). Trudy sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konf.* [Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2018). Proceedings of the seventh scientific and technical conf.]. 2018, pp. 117–119. (In Russian)

12. Shilin A. O. Vnedrenie KSAU SP v ramkakh kontseptsii tsifrovoy zheleznodorozhnoy stantsii [Implementation of the DSAU SP within the framework of the concept of a digital railway station]. *Voprosy nauki* [Questions of Science]. 2022, Iss. 3, pp. 73–77. (In Russian)

13. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S., Schmidt A. O. O tekhnologii rascheta zheleznodorozhnykh stantsiy [On the technology of calculating railway stations]. *Tendentsii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta i upravleniya perevozochnym protsessom: mat-ly Mezhdunar. yubileynoy nauchno-tekhnicheskoy konf., posvyashchennoy 95-letiyu kafedr “Zheleznodorozhnye stantsii i transportnye uzly”, “Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy i bezopasnost'yu na transporte”* [Trends in the development of railway transport and transportation process management: materials of the International. jubilee scientific and technical conf. dedicated to the 95th anniversary of the departments “Railway Stations

and Transport Hubs”, “Management of Operational Work and Safety in Transport”]. Moscow, 2020, pp. 41–47. (In Russian)

14. Chebotareva E. A. Modelirovanie elementov professional'noy intuitsii v cheloveko-mashinnykh sistemakh dlya resheniya zadach operativnogo upravleniya zheleznodorozhnym transportom [Modeling elements of professional intuition in human-machine systems for solving problems of operational management of railway transport]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [The world of transport and technological machines]. 2023, Iss. 3-4 (82), pp. 61–69. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-3-4(82)-61-69. (In Russian)

15. Shevchenko D. V. Metodologiya postroeniya tsifrovyykh dvoynikov na zheleznodorozhnom transporte [Methodology for constructing digital twins in railway transport]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport]. 2021, vol. 80, Iss. 2, pp. 91–99. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99. (In Russian)

16. Lychkina N. N., Pavlov V. V. Kontsepsiya tsifrovogo dvoynika i rol' imitatsionnykh modeley v arkhitekture tsifrovogo dvoynika [The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023): sbornik trudov odinnadsatoy vserossiyskoy nauchno-prakt. konf. po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [Simulation modeling. Theory and practice (IMMOD-2023): collection of works of the eleventh all-Russian scientific and practical. conf. on simulation modeling and its application in science and industry]. Kazan, 2023, pp 139–149. (In Russian)

17. Kurtikova E. R., Shevchenko D. A., Karzakov V. A. Primenenie neyronnykh setey dlya klassifikatsii zheleznodorozhnykh stantsiy [Application of neural networks for classification of railway stations]. *V sbornike: Kochnevskie chteniya — 2023: sovremennaya teoriya i praktika ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog. Trudy II-y Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.* [In the collection:

Kochnevsky readings — 2023: modern theory and practice of operational work of railways. Proceedings of the II-nd Int. scientific-practical. conf.]. M., 2023, pp. 359–362. (In Russian)

18. Mishkurov P. N., Rakhmangulov A. N. Osobennosti postroeniya agentnoy imitatsionnoy modeli zheleznodorozhnoy stantsii [Features of constructing an agent-based simulation model of a railway station]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the transport complex of Russia]. 2021, vol. 11, Iss. 1, pp. 29–40. DOI: 10.18503/2222-9396-2021-11-1-29-40. (In Russian)

19. Erofeev A. A. Ekhnologii iskusstvennogo intellekta pri reshenii ekspluatatsionnykh zadach v sisteme smenno-uchetnogo planirovaniya gruzovoy raboty zheleznodorozhnykh stantsiy [Artificial intelligence technologies in solving operational problems in the system of shift-accounting planning of freight operations at railway stations]. *Problemy perspektivnogo razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [Problems of prospective development of railway stations and junctions]. 2022, Iss. 1 (4), pp. 102–108. (In Russian)

20. Chebotareva E. A. Analiz meropriyatiy po povysheniyu propusknoy sposobnosti uchastkov Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi [Analysis of measures to increase the throughput capacity of sections of the North Caucasian Railway]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. 2022, Iss. 1, pp. 29–34. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-01-5. (In Russian)

Received: October 20, 2024

Accepted: December 05, 2024

Author's information:

Enver A. MAMAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; mamaev_enver@mail.ru

Evgenia A. CHEBOTAREVA — PhD in Engineering, Associate Professor; abrosimova@yandex.ru

УДК 629.4

Использование методов машинного обучения для решения задачи энергооптимального движения поезда

С. Г. Истомина, К. И. Доманов, А. П. Шатохин, И. Н. Денисов, А. А. Лаврухин

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, Маркса пр., 35

Для цитирования: Истомина С. Г., Доманов К. И., Шатохин А. П., Денисов И. Н., Лаврухин А. А. Использование методов машинного обучения для решения задачи энергооптимального движения поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 75–84. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-75-84

Аннотация

Цель: Выбрать и обосновать методы и алгоритмы машинного обучения с целью построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива с поездом в режиме реального времени. Ранее был определен уровень фактического использования систем автоматизации вождения грузовых поездов магистральными грузовыми электровозами постоянного тока, а также выявлены факторы, влияющие на энергооптимальный график исполненного движения поездов. Настоящая статья посвящена новому этапу разработки инновационной технологии по автоматизированному управлению локомотивом с поездом в рамках выполнения проекта по гранту ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте. **Методы:** Использовались методы оптимизации в машинном обучении с применением программного обеспечения, предназначенного для моделирования нелинейных динамических систем. **Результаты:** Было установлено, что для решения задачи определения оптимальной позиции контроллера машиниста путем использования результатов обучений рекуррентной нейронной сети является метод Левенберга — Марквардта. Получены графические зависимости гистограмм ошибок и изменения суммарной среднеквадратической ошибки в процессе обучения искусственной нейронной сети. **Практическая значимость:** Результаты работы могут быть использованы при разработке аппаратно-программных комплексов, с применением методов и алгоритмов искусственного интеллекта, направленных на повышение энергетической эффективности перевозочного процесса.

Ключевые слова: Машинное обучение, локомотив, искусственный интеллект, автоматизированное управление, энергооптимальный график движения, энергетическая эффективность.

Введение

Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса является одним из приоритетных направлений развития компании ОАО «РЖД» [1]. Поэтому разработка методов и алгоритмов энергооптимального движения поездов на всех железнодорожных полигонах России является актуальной задачей.

В этой связи разные коллективы ученых ведут исследования в данной области с использованием классических методов теории тяги поездов, однако в условиях развития систем цифровизации и современных локомотивов перспективным является применение для исполнения данных задач методов и алгоритмов машинного обучения с использованием искусственного интеллекта.

Исследователи из АО «НИИАС» и TÜV Rheinland (Кельн, Германия) в своей работе [2] описали возможность применения графового Марковского метода расчета безопасности и надежности сложных систем при использовании в технологиях автоведения поездов путем повышения эффективности машинного обучения программных средств технического зрения. В работе [3] исследователя из Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I определено, что с помощью применения машинного обучения можно повысить точность расчета технико-экономических моделей высокоскоростных магистралей, а в дальнейшем сократить затраты на эксплуатацию подвижного состава. Коллектив ученых из Нидерландов в своем исследовании [4] описали существующие алгоритмы для энергоэффективного управления поездами и составления расписания с использованием методов машинного обучения. Китайские ученые в своих исследованиях [5–7] задачу оптимального планирования траектории движения поезда рассмотрели как задачу смешанного целочисленного линейного программирования путем аппроксимации нелинейных членов заданных кусочно-аффинными функциями. Американские ученые в работе [8] предложили новую модель динамического контроля скоростного режима ведения поездов в стохастической транспортной сети для повышения энергоэффективности перевозочного процесса.

Данная статья представляет собой изложение второго этапа разработки технологии построения динамических моделей энергооптимального движения локомотива в режиме реального времени для интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления подвижным составом с применением методов и алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. Первый этап разработки новой технологии изложен в [9], где определен уровень фактического использо-

вания систем автоматизации вождения грузовых поездов на участках Урало-Сибирского железнодорожного полигона и его влияние на энергооптимальный график исполненного движения поездов, а также приведен анализ влияния современных тенденций в области энергосбережения и улучшения эффективности использования тяговых энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте на тягу поездов, который показал, что в настоящее время малоисследованными остаются режимы ведения поезда, построенные на методах и алгоритмах машинного обучения и искусственного интеллекта.

В настоящей статье авторами с использованием программного обеспечения Matlab выполнено компьютерное моделирование режимов работы (тяга, выбег, электрическое торможение, пневматическое торможение) магистрального грузового электровоза серии 2ЭС6 «Синара» на участке Входная — Иртышское Западно-Сибирской железной дороги. В качестве исходных данных для моделирования использовались следующие данные реальных поездов из системы РПДА-Г, производства компании АВП «Технология» (более 35 000 поездов за 2023 год): профиль пути элемента железнодорожного участка, скорость движения поезда на заданном элементе пути, напряжение на токоприемнике, сила тяги, ток электровоза (на токоприемнике), мощность электровоза, масса состава, позиция контроллера машиниста (текущая и предыдущая), время прохода элемента пути железнодорожного участка.

Исследуемые алгоритмы машинного обучения

С теоретической точки зрения искусственный интеллект — это наука, позволяющая научить машины думать и принимать решения, а машинное обучение является его разделом. На сегодняшний день существует множество алгоритмов машинного обучения для решения транспорт-

ных задач. В качестве примера можно привести несколько наиболее часто используемых:

- линейная регрессия;
- метод опорных векторов;
- метод k -ближайших соседей;
- деревья решений;
- ансамбли;
- метод k -средних.

Стоит отметить, что данная классификация может быть сведена к трем основным методам [10]:

1) контролируемое обучение (алгоритмы строят свой прогноз на основе выборок, в которых мы знаем, как выглядит результат);

2) неконтролируемое обучение (метод используется, если неизвестен конечный результат);

3) обучение с подкреплением (при решении задачи алгоритм получает отзыв о правильном или неправильном решении, накапливая тем самым историю подкрепления).

Для решения задачи энергооптимального движения локомотива важным является выбор алгоритма оптимизации, который является основой

машинного обучения. К основным достоинствам такого выбора можно отнести то, что оптимизация позволяет определить наилучшее решение из различных возможных.

Алгоритмы оптимизации делятся на два основных класса: алгоритмы первого порядка и второго порядка.

К алгоритмам первого порядка можно отнести: градиентный спуск; методы стохастической оптимизации; эволюционные алгоритмы; мета-эвристическая оптимизация; алгоритмы роевого интеллекта; гиперпараметрическая оптимизация; оптимизация в глубоком обучении.

К алгоритмам второго порядка относят: метод Ньютона и квази-ньютоновские методы; ограниченную оптимизацию; Байесовскую оптимизацию.

Выбирая оптимальный алгоритм для последующего обучения нейронной сети, необходимо учитывать предыдущие результаты ее обучения. Для используемой в настоящем исследовании рекуррентной нейронной сети (рис. 1) показателями качественной аппроксимации будут являться

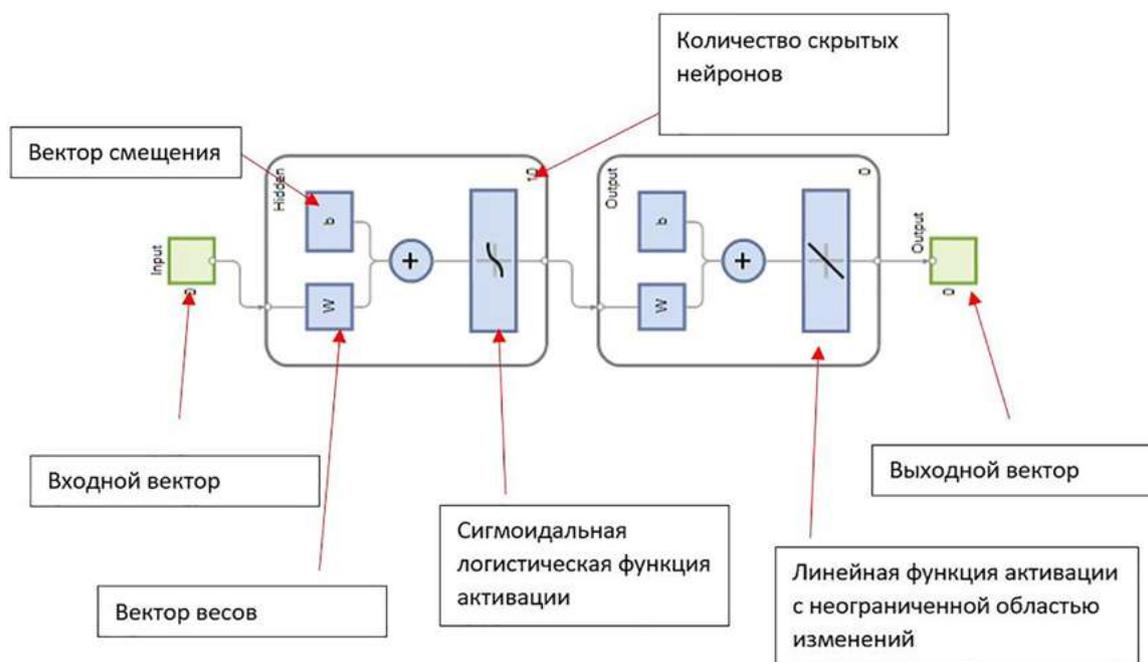


Рис. 1. Сеть прямого распространения

затраченное время на обучение, схожесть проверочного и тестового наборов по характеристикам, отсутствие переобучения, величина регрессии, а также низкая суммарная среднеквадратическая ошибка между входами сети прямого распространения и целевыми значениями:

$$F = mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2,$$

где F — суммарная среднеквадратическая ошибка;
 N — размер выборки (количество значений данных);

t — фактическое (истинное) значение данных;
 a — прогнозируемое (предсказанное) значение данных;

e — ошибка (разность между желаемым и реальным сигналом), безразмерная величина, это разность при сравнении входного и выходного вектора которая должна соответствовать целевому вектору.

В качестве алгоритмов обучения в работе были исследованы и апробированы следующие методы: Левенберга — Марквардта (Levenberg — Marquardt); связанных градиентов Полака — Рибера (Polak — Ribiere); связанных градиентов Флетчера — Пауэлла (Fletcher — Powell); связанных градиентов Пауэлла — Била (Powell — Beale); тренировка сети с использованием квази-ньютоновского метода BFGS; регуляризация Bayesian; градиентного спуска; градиентного спуска с адаптивным обучением; градиентного спуска с учетом моментов; градиентного спуска с учетом моментов и с адаптивным обучением; одноступенчатый метод секущих; упругого обратного распространения; последовательных приращений.

Обучение нейронной сети и определение суммарной среднеквадратической ошибки

Для обучения использовались входные вектора данных, состоящих из параметров, полученных по результатам поездок ведения поездов — про-

филь пути элемента железнодорожного участка, скорость движения поезда на заданном элементе пути, напряжение на токоприемнике, сила тяги, ток электровоза (на токоприемнике), мощность электровоза, масса состава, позиция контроллера машиниста (текущая и предыдущая), время прохода элемента пути железнодорожного участка [9].

Выходным вектором по результатам обучения была принята позиция контроллера машиниста.

Остановка обучения проводилась после того, как значение функции ошибки нейронной сети возрастала шесть эпох подряд.

Рассмотрим более подробно результаты моделирования данных с РПДА-Г с использованием метода Левенберга — Марквардта и метода градиентного спуска с адаптивным обучением и выявим подходящий алгоритм оптимизации с точки зрения затраченного времени обучения, среднеквадратической ошибки и кучности значений на выходе к наклонной прямой для решения задачи энергооптимального движения поезда. Результаты моделирования для остальных методов авторы не приводят ввиду ограниченности объема публикации. Стоит отметить, что данные методы показали худшие результаты.

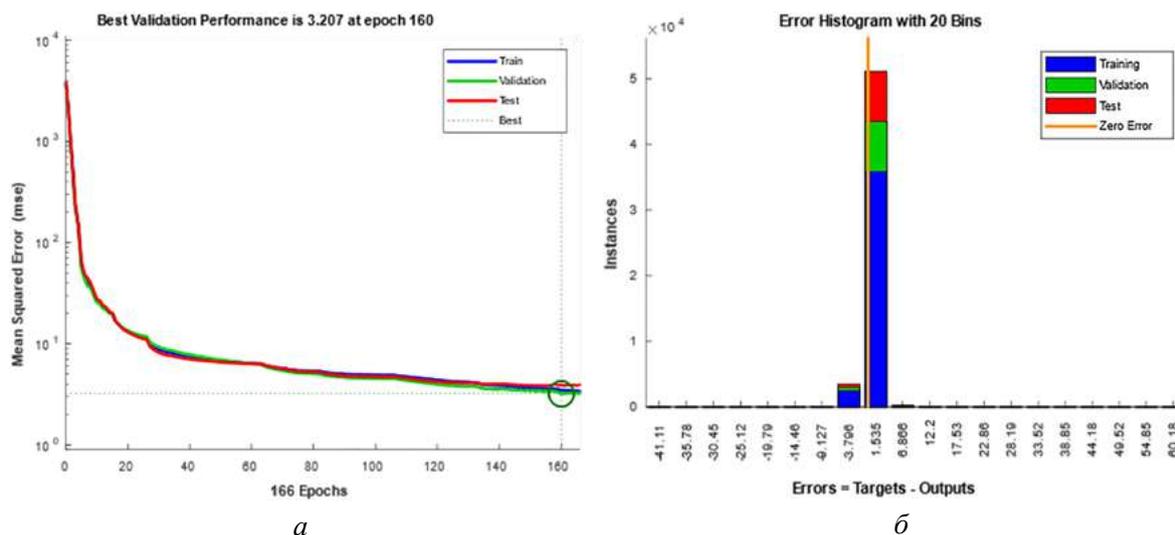
Метод Левенберга — Марквардта (Levenberg — Marquardt) является нелинейным методом наименьших квадратов. Он представляет собой симбиоз таких методов, как метод наискорейшего спуска, метод Ньютона и метод Гаусса — Ньютона [11]. К достоинствам исследуемого метода можно отнести:

- наибольшую устойчивость среди проанализированных методов;
- наибольшие шансы найти глобальный экстремум;
- высокую скорость сходимости результатов моделирования.

В табл. 1 приведены исходные параметры для проведения обучения нейронной сети. Для этого было использовано специальное программное

Таблица 1. Параметрические данные обучения нейронной сети с использованием метода Левенберга — Марквардта

Параметр	Начальное значение	Значение останков бучения	Целевое значение
Эпоха	0	166	1000
Время обучения	—	00:02:15	—
Погрешность сети	3.8e+03	3.4	0
Градиент	1.47e+04	18	1e-07
Ми	0.001	0.001	1e+10
Проверка валидации	0	6	6

Рис. 2. Изменение ошибки mse (а) в процессе обучения искусственной нейронной сети и гистограмма ошибок (б) методом Левенберга — Марквардта

обеспечение MathWorks. Результаты показали, что на обучение затрачено 2 минуты 15 секунд, минимальное значение функции ошибки получено на 160 эпохе, после чего на 166 эпохе было остановлено обучение ввиду возрастания функции ошибки.

С теоретической точки зрения важно отметить (рис. 2) минимальное значение mse , равное 3,207 (а). Ошибка проверочного (Validation) и тестового (Test) набора имеет схожий характер, то есть отсутствует переобучение сети. Гистограмма ошибок (б) показывает незначительный разброс данных по тестовой и проверочной выборке, что свидетельствует о высокой доли вероятности прогнозирования исходных данных.

Наряду с вышесказанным необходимо обратить внимание (рис. 3) на итоговое состояние

обучения сети и полученные числовые характеристики регрессии для наборов данных (б), значения которых близки к 1. Это свидетельствует о том, что нейронная сеть хорошо аппроксимировала искомую зависимость. Стоит отметить и кучность значений на выходе к наклонной прямой, что также подтверждает удовлетворительное качество обучения.

В свою очередь, проведя обучение нейронной сети с использованием метода градиентного спуска с адаптивным обучением, выявлено, что не в каждой ситуации результаты показывают сходимость быстрее обычного градиентного спуска, однако исследуемый метод гораздо стабильнее минимизирует функцию потерь. В табл. 2 приведены исходные параметры для проведения обучения нейронной сети методом градиентного спу-

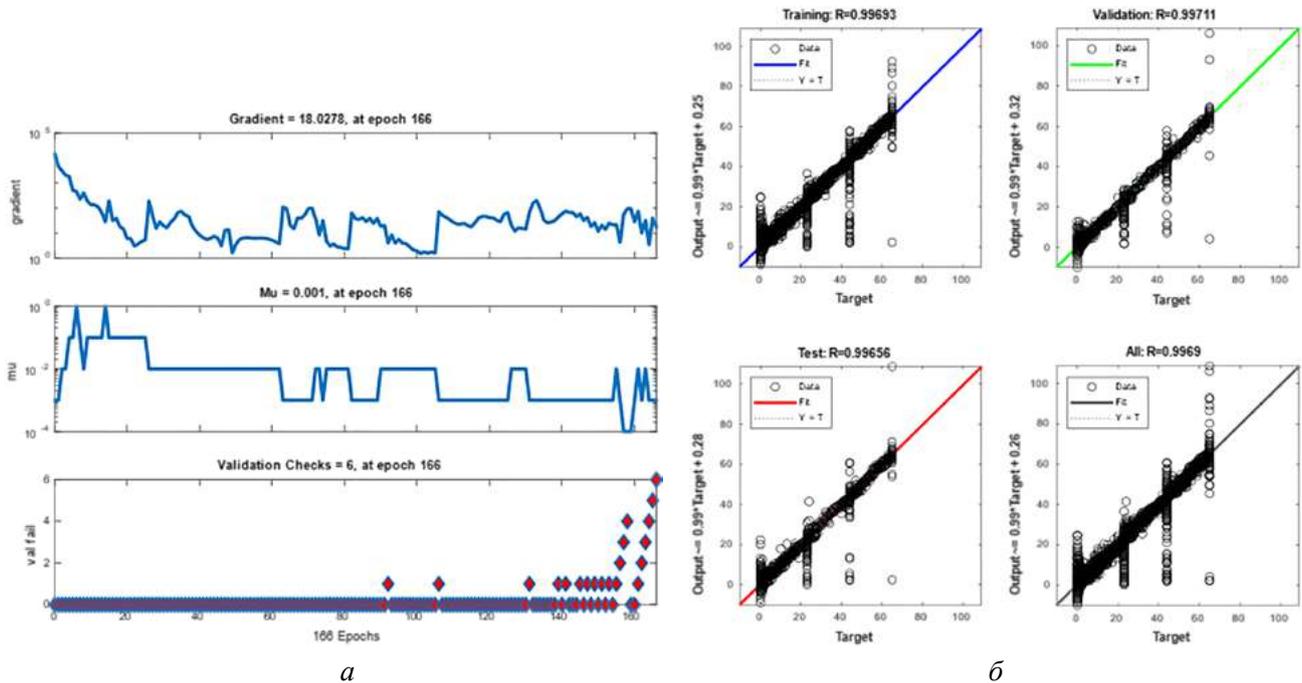


Рис. 3. Состояние обучения нейронной сети (а) и линейная регрессия (б) методом Левенберга — Марквардта

Таблица 2. Параметрические данные обучения нейронной сети с использованием метода градиентного спуска с адаптивным обучением

Параметр	Начальное значение	Значение останковки бучения	Целевое значение
Эпоха	0	84	1000
Время обучения	—	00:00:17	—
Погрешность сети	432	114	0
Градиент	5.12e+03	1.29e+03	1e-05
Му	0	6	6
Проверка валидации	0	84	1000

ска с адаптивным обучением. Из таблицы видно, что на обучение затрачено 17 секунд, минимальное значение функции ошибки получено на 78 эпохе, после чего на 84 эпохе было остановлено обучение ввиду возрастания функции ошибки.

Следует обратить внимание на то (рис. 4), что по результатам обучения минимальное значение mse получилось равным 115,366 (а), что в значительной степени больше, чем в методе Левенберга — Марквардта. Ошибка проверочного (Validation) и тестового (Test) набора имеет

схожий характер, отсутствует переобучение сети. Гистограмма ошибок (б) показывает разброс данных по тестовой и проверочной выборке больше, чем в методе Левенберга — Марквардта.

Наиболее важным представляется меньшая кучность значений на выходе к наклонной прямой в сравнении с методом Левенберга — Марквардта. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

По результатам имитационного моделирования определено, что наиболее подходящим

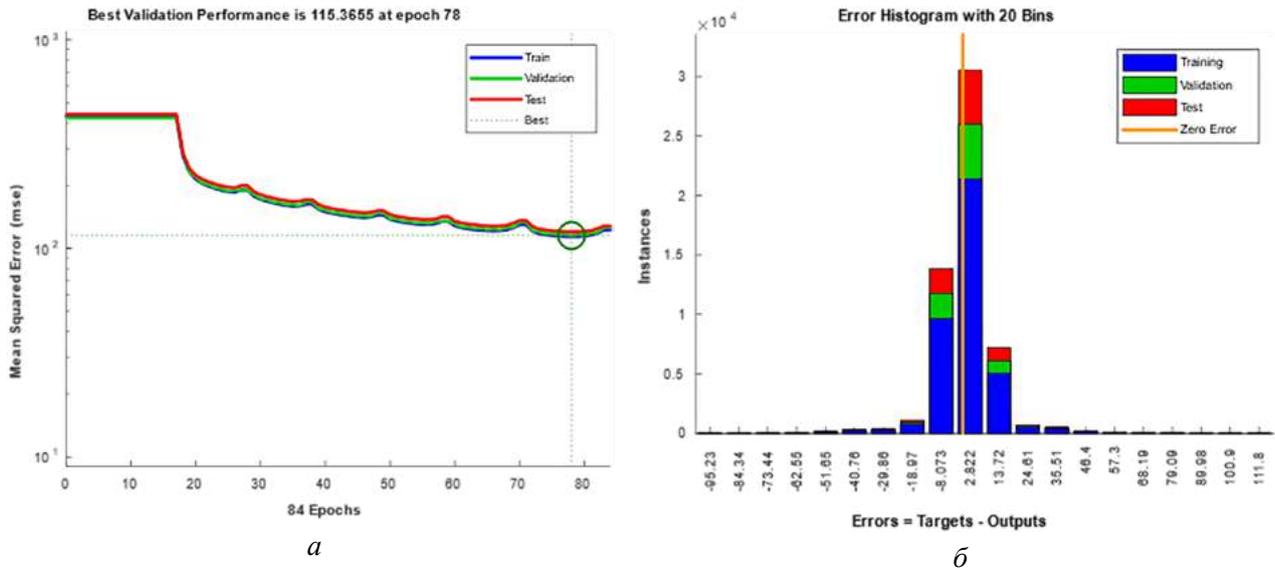


Рис. 4. Изменение ошибки *mse* (а) в процессе обучения искусственной нейронной сети и гистограмма ошибок (б) методом градиентного спуска с адаптивным обучением

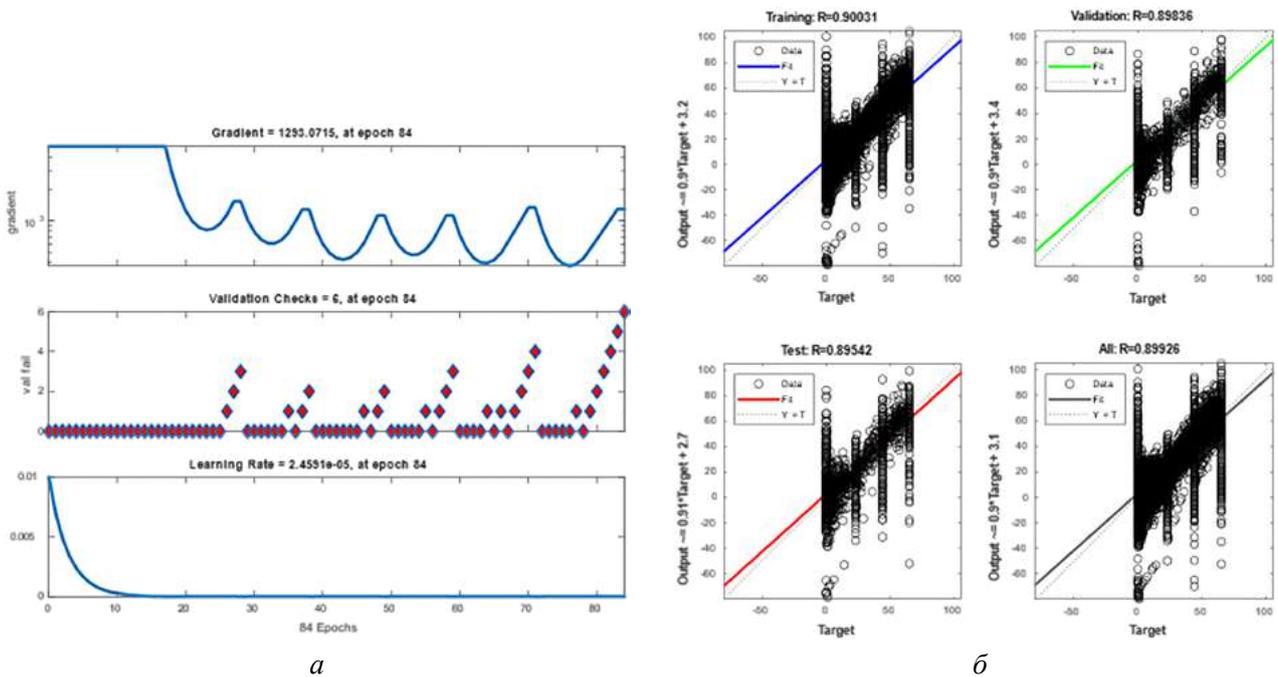


Рис. 5. Состояние обучения нейронной сети (а) и линейная регрессия (б) методом градиентного спуска с адаптивным обучением

алгоритмом оптимизации для решения задачи определения оптимальной позиции контроллера машиниста с точки зрения затраченного времени обучения, среднеквадратической ошибки и кучности значений на выходе к наклонной прямой является метод Левенберга — Марквардта.

Заключение

В результате проведенного исследования получены данные, которые подтверждают высокую эффективность применения нейронных сетей для определения наиболее энергоэффективной позиции контроллера машиниста, ввиду кучно-

сти значений вдоль прямой квадрата регрессии и низкого количества выбросов значений по результатам обучения нейронной сети.

Скорость вычислений и достигаемая точность подтверждает возможность создания интеллектуально-адаптивной системы поддержки управления тяговым подвижным составом.

По результатам моделирования ошибка определения позиции контроллера в зависимости от метода оптимизации при обучении нейронной сети варьировалась от 2,19 до 15 814,94, что характеризует рассеивание значений случайной величины относительно ее математического ожидания.

Время решения задачи определения позиции контроллера машиниста составляла от 5 секунд до 27 минут — данное заключение носит предварительный характер, так как способность компьютера обрабатывать массив данных зависит от технических характеристик его процессора.

Выявлено, что для более точного определения величины тока и позиции контроллера машиниста при проектировании сети наиболее важным является подготовка данных для обучения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте, № 5549635 от 31.01.2024.

Список источников

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года / Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. — М., 2016. — 76 с.

2. Шубинский И. Б. К оценке безопасности системы автоведения поездов / И. Б. Шубинский, Х. Шебе, Е. Н. Розенберг // Надежность. — 2021. — Т. 21. —

№ 4. — С. 31–37. — DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-31-37.

3. Сычугов А. Н. Применение машинного обучения для анализа технических характеристик и параметров эксплуатируемого подвижного состава на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. Н. Сычугов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — № 2. — С. 171–180. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-171-180.

4. Scheepmaker G. M. Review of energy-efficient train control and timetabling / G. M. Scheepmaker, R. M. P. Goverde, L. G. Kroon // European Journal of Operational Research. — 2017. — Iss. 257(2). — Pp. 355–76. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>.

5. Wang Y. Optimal trajectory planning for trains — A pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach / Y. Wang, B. De Schutter, T. J. J. van den Boom et al. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2013. — Vol. 29. — Pp. 97–114. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.01.007>.

6. Wang X. Intelligent operation of heavy haul train with data imbalance: A machine learning method / X. Wang, S. Li, T. Tang et al. // Knowledge-Based Systems. — 2019. — Vol. 163. — Pp. 36–50. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2018.08.015>.

7. Zhang C. Y. Data-driven train operation models based on data mining and driving experience for the diesel-electric locomotive / C. Y. Zhang, D. Chen, J. Yin et al. // Advanced Engineering Informatics. — 2016. — Vol. 30(3). Pp. 553–63. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.004>.

8. Zhu F. Accounting for dynamic speed limit control in a stochastic traffic environment: A reinforcement learning approach / F. Zhu, S. V. Ukkusuri // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2014. — Vol. 41. — Pp. 30–47. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.014>.

9. Истомин С. Г. Текущее состояние и перспективы развития систем энергооптимального управления электровозами 2ЭС6 / С. Г. Истомин, К. И. Доманов, А. П. Шатохин и др. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). — 2024. — Т. 83. — № 3. — С. 215–229.

10. Акатъев Я. А. Анализ особенностей алгоритмов машинного обучения в автоматизированных системах вождения / Я. А. Акатъев, А. Р. Латыпов // E-Scio. — 2022. — № 1(64). — С. 641–655.

11. Chopra D. Introduction to Machine Learning / D. Chopra, R. Khurana // Introduction to Machine Learning with Python. — 2023. — Vol. 28. — Pp. 15–29. — URL: <http://dx.doi.org/10.2174/9789815124422123010004>.

Дата поступления: 20.11.2024

Решение о публикации: 20.01.2025

Контактная информация:

ИСТОМИН Станислав Геннадьевич — канд. техн. наук, доц.; istomin_sg@mail.ru

ДОМАНОВ Кирилл Иванович — канд. техн. наук, доц.; dki35@ya.ru

ШАТОХИН Андрей Петрович — канд. техн. наук, директор; shatohin_ap@mail.ru

ДЕНИСОВ Илья Николаевич — зав. лабораторией; idenisov89@mail.ru

ЛАВРУХИН Андрей Александрович — канд. техн. наук, доц.; a.a.lavrukhin@ya.ru

The Use of Machine Learning Methods to Solve the Problem of Energy-Efficient Train Movement

S. G. Istomin, K. I. Domanov, A. P. Shatokhin, I. N. Denisov, A. A. Lavrukhin

Omsk State Transport University, Russian Federation, 35, Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Istomin S. G., Domanov K. I., Shatokhin A. P., Denisov I. N., Lavrukhin A. A. The Use of Machine Learning Methods to Solve the Problem of Energy-Efficient Train Movement // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 75–84. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-75-84

Summary

Purpose: To select and verify methods and algorithms of machine learning to build dynamic models of a train energy-efficient movement in real time. Earlier, the use of DC electric locomotives for driving freight trains was assessed and the factors influencing the energy-efficient train movement were identified. This paper is devoted to the latest innovations in the field of automated train control within the framework of the JSC “Russian Railways” grant project for young scientists to carry out scientific research aimed at creating new equipment and technologies for railway transport. **Methods:** Optimization methods for machine learning were applied using model nonlinear dynamic systems. **Results:** The Levenberg-Marquardt method has been found most appropriate for determining the optimal position of the train driver controller by using recurrent neural network training. Graphical dependences of error histograms and total mean square error (MSE) variations in the process of artificial neural network training have been obtained. **Practical significance:** The results of the research can be used in the development of hardware and software systems using artificial intelligence methods and algorithms aimed at energy-efficiency improvement in transportation process.

Keywords: Machine learning, locomotive, artificial intelligence, automated control, energy-optimal schedule, energy efficiency.

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant from JSC Russian Railways for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport No. 5549635 dated 01/31/2024.

References

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga "Rossiyskie zheleznye dorogi" na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14 dekabrya 2016 g. № 2537r* [Energy strategy of the Russian Railways holding company for the period up to 2020 and for the future up to 2030. Approved by the order of Russian Railways dated December 14, 2016 № 2537r]. Moscow, 2016, 76 p. (In Russian)
2. Shubinskiy I. B., Shebe Kh., Rozenberg E. N. K otsenke bezopasnosti sistemy avtovedeniya poezdov [On the safety assessment of the automatic train control system]. *Nadezhnost' [Reliability]*. 2021, vol. 21, Iss. 4, pp. 31–37. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-4-31-37. (In Russian)
3. Sychugov A. N. Primenenie mashinnogo obucheniya dlya analiza tekhnicheskikh kharakteristik i parametrov ekspluatiruemogo podvizhnogo sostava na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Application of machine learning for the analysis of technical characteristics and parameters of operating rolling stock on high-speed railways]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of scientific research results]*. 2023, Iss. 2, pp. 171–180. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-171-180. (In Russian)
4. Scheepmaker G. M., Goverde R. M. P., Kroon L. G. Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 2017, Iss. 257(2), pp. 355–76. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>.
5. Wang Y., Schutter B. De, van den Boom T. J. J. et al. Optimal trajectory planning for trains — A pseudospectral method and a mixed integer linear programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, vol. 29, pp. 97–114. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.01.007>.
6. Wang X., Li S., Tang T. et al. Intelligent operation of heavy haul train with data imbalance: A machine learning method. *Knowledge-Based Systems*, 2019, vol. 163, pp. 36–50. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2018.08.015>.
7. Zhang C. Y., Chen D., Yin J. et al. Data-driven train operation models based on data mining and driving experience for the diesel-electric locomotive. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, vol. 30(3), pp. 553–63. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.004>.
8. Zhu F., Ukkusuri S. V. Accounting for dynamic speed limit control in a stochastic traffic environment: A reinforcement learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, vol. 41, pp. 30–47. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.014>.
9. Istomin S. G., Domanov K. I., Shatokhin A. P. et al. Tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem energooptimal'nogo upravleniya elektrovozami 2ES6 [Current state and development prospects of energy-optimal control systems for 2ES6 electric locomotives]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT)* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport (Vestnik VNIIZhT)]. 2024, vol. 83, Iss. 3, pp. 215–229. (In Russian)
10. Akat'ev Ya. A., Latypov A. R. *Analiz osobennostey algoritmov mashinnogo obucheniya v avtomatizirovannykh sistemakh vozhdeniya* [Analysis of machine learning algorithms features in automated driving systems]. *E-Scio*, 2022, Iss. 1(64), pp. 641–655. (In Russian)
11. Chopra D., Khurana R. Introduction to Machine Learning. *Introduction to Machine Learning with Python*, 2023, vol. 28, pp. 15–29. Available at: <http://dx.doi.org/10.2174/9789815124422123010004>.

Received: November 20, 2024

Accepted: January 20, 2025

Author's information:

Stanislav G. ISTOMIN — PhD in Engineering, Associate Professor; istomin_sg@mail.ru

Kirill I. DOMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; dki35@ya.ru

Andrey P. SHATOKHIN — PhD in Engineering, Director; shatohin_ap@mail.ru

Il'ya N. DENISOV — Head of Laboratories; idenisov89@mail.ru

Andrey A. LAVRUHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; a.a.lavrukhin@ya.ru

УДК 656.022.8

О перспективах сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Минск

Н. С. Бушуев, М. С. Храбрая

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

Для цитирования: Бушуев Н. С., Храбрая М. С. О перспективах сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Минск // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 85–91. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-85-91

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости и социально-экономической целесообразности сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСМ) Москва — Минск. Проанализировать роль и место ВСМ Москва — Минск в составе перспективной сети ВСМ союзных государств, а также ее основные технические и стоимостные показатели. **Методы:** Анализ публикаций о перспективах сооружения ВСМ, в частности в России; сравнительный анализ проектных решений по различным перспективным направлениям ВСМ в России; статистический анализ фактических и перспективных объемов пассажирских перевозок. **Результаты:** Показана сравнительная стоимость сооружения и протяженность ВСМ по наиболее перспективным направлениям в России. Выявлено, что Москва является наиболее востребованным направлением взаимодействия со столицей Республики Беларусь как в экономической (производство, бизнес и др.), так и социальной сферах (культурно-творческие связи, туризм и др.). Значительный рост пассажиропотока выявлен в части авиаперевозок, что также свидетельствует о востребованности развития и улучшения транспортного сообщения столиц двух братских государств. Показан рост потенциала ОАО «РЖД» в освоении и наращивании объемов пассажирских перевозок. **Практическая значимость:** Показана целесообразность, как для России, так и для Республики Беларусь, сооружения высокоскоростной железнодорожной магистрали для улучшения и развития их сотрудничества по самым различным направлениям экономики и социальной сферы.

Ключевые слова: Высокоскоростная железнодорожная магистраль (ВСМ), пассажиропоток, стоимость строительства ВСМ, протяженность ВСМ, перспективные направления ВСМ.

Проекты строительства высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) являются объектами повышенного внимания общественности и научного сообщества [1–7]. Основная проблема при строительстве — это высокая стоимость, которая будет окупаться долгие годы. Проектирование новых линий ВСМ развивает экономику страны путем увеличения транспортной доступности, повышает конкурентоспособность на рынке транспортных услуг, увеличивает провозную способ-

ность грузовых поездов попутных обычных железных дорог. Одним из наиболее привлекательных направлений ВСМ в России является направление Москва — Санкт-Петербург [8–13]. Международный союз железных дорог определяет высокоскоростные магистрали как железнодорожные трассы, обеспечивающие движение поездов со скоростью не менее 200 км/ч для существующих путей и 250 км/ч или быстрее — для вновь специально построенных линий [14].

Стоимость строительства ВСМ, трлн рублей

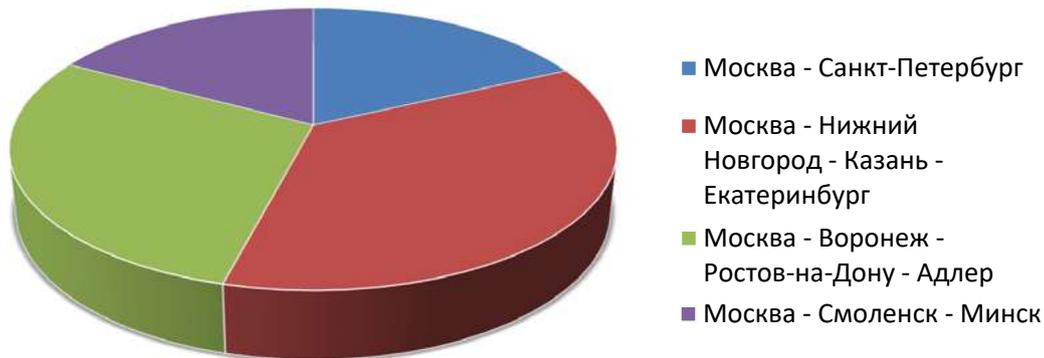


Рис. 1. Круговая диаграмма приближенной стоимости строительства ВСМ

Протяженность направлений ВСМ, км



Рис. 2. Гистограмма примерной протяженности проектов ВСМ

Одной из последних новостей в сфере железнодорожного транспорта России является строительство высокоскоростной магистрали Москва — Минск. Проект получил название «Союз». В августе 2023 года Владимир Владимирович Путин заявил о запуске проекта по строительству ВСМ, которая должна связать Москву и Минск [15]. 29 февраля 2024 года во время своего послания Федеральному собранию Владимир Путин подтвердил строительство магистрали, которая пройдет через Смоленск [16]. Проект поддержал президент Республики Беларусь Александр Лукашенко.

Для того чтобы понять, во сколько обойдется строительство линии, мы сделали диаграмму (рис. 1), на которой приведены приблизительные затраты на строительство четырех проектов ВСМ.

Приблизительная стоимость проектов ВСМ [17]:

Москва — Санкт-Петербург — 2 трлн рублей;
Москва — Нижний Новгород — Казань — Екатеринбург — 4 трлн рублей;

Москва — Воронеж — Ростов-на-Дону — Адлер — 3,2 трлн рублей;

Москва — Смоленск — Минск — 1,9 трлн рублей.

Примерная стоимость 1 км ВСМ по указанным направлениям составит 2,7 млрд рублей.

Протяженность высокоскоростных линий представлена на рис. 2.

Расстояние между Москвой и Минском превышает 700 км. Запуск высокоскоростных поездов сократит время следования до 3–4 часов вместо 7 часов. Высокоскоростная магистраль обеспечит улучшение транспортной связи и снизит нагрузку на дорожную инфраструктуру между Россией и Беларуссией.

Схема четырех наиболее перспективных направлений ВСМ России представлена на рис. 3.

По данным Белорусской железной дороги (БЖД), на 3 августа 2023 года порядка 150 поездов курсируют ежедневно между Беларуссией и Россией, в январе — июле 2023 года объем перевозок пассажиров составил 1,5 млн человек [18]. Одними из самых популярных направлений считаются Москва и Санкт-Петербург.

На долю перевозок между Беларуссией и двумя крупнейшими городами России приходится почти 87 % прямого международного сообщения, или более 1,18 млн пассажиров [19].

Авиасообщение между Россией и Беларуссией пользуется большим спросом. Так, в 2021 году в сообщении Москва — Минск количество авиарейсов было увеличено с 10 до 20 раз в неделю.

По данным на 9 августа 2024 года, компания «Аэрофлот» включила Минск в топ-5 городов по росту пассажирского потока с Россией. Пассажиропоток авиарейсов между Беларуссией и РФ вырос в 4,6 раза. Такой рост произошел за период с 2021 по 2024 год. За первые восемь месяцев



Рис. 3. Стратегии правительства по развитию инфраструктуры до 2030 года [17]

2024 года рост пассажиропотока по сравнению с аналогичным периодом 2021 года составил 4,6 раза, достигнув 1,093 млн человек по сравнению с 239 тыс. в 2021 году [20].

«Сегодня мы видим значительный рост спроса на авиaperезовки между Беларуссией и Россией. В связи с этим ведется активная работа по расширению маршрутной сети “Белавиа” именно в этом направлении», — сообщил министр транспорта и коммуникаций Республики Беларусь А.Н. Авраменко в интервью государственной газете «СБ. Беларусь сегодня» [21].

По данным годовых отчетов компании ОАО «РЖД» [22], динамика пассажирских перевозок в Российской Федерации в последние годы показывает их рост (см. табл.). Строительство новой линии ВСМ Москва — Минск будет востребовано для обоих государств и улучшит их экономическое положение. Время в пути уменьшится в 2 раза, что позволит пассажирам проезжать все расстояние между двумя столицами всего лишь за 3–4 часа.

Основные показатели пассажирских перевозок по инфраструктуре ОАО «РЖД»

Период	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Пассажирооборот, млрд пасс.-км	124,5	122,9	129,4	133,4	78,1	103,4	112,8	136,3

*Данные годовых отчетов компании ОАО «РЖД» [22].

На Петербургском международном экономическом форуме 2024 года (ПМЭФ-2024) проект был представлен на стенде Москвы «ВСМ-4 «Союз» Минск — Смоленск — Москва). Российская часть трассы уже внесена в схему территориального планирования, на данный момент ведется работа с белорусскими коллегами для определения дальнейших шагов по проекту.

Выводы и рекомендации

В статье рассмотрены общие вопросы, связанные с сооружением ВСМ Москва — Минск. Очевидно, что многие из этих вопросов требуют дальнейшей разработки и дополнительных исследований. В частности, требуют дополнительной проработки: размеры перспективного пассажиропотока по ВСМ; размеры возможного грузопотока по ВСМ; параметры и основные показатели сооружения ВСМ; положение трассы ВСМ и ее важнейших инфраструктурных объектов.

Список источников

1. Бушуев Н. С. О перспективах развития высокоскоростных железнодорожных магистралей в России / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Бюллетень результатов научных исследований. — 2017. — № 3. — С. 7–14.
2. Киселев И. П. Новые горизонты высокоскоростного железнодорожного транспорта / И. П. Киселев, О. Н. Назаров // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 12. — С. 70–76.
3. Bushuev N. S. Modeling of container freight and passenger traffic / N. S. Bushuev, D. O. Shulman, K. M. Sagaidak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019. — 2019. — P. 012226.
4. Бушуев Н. С. О проектах высокоскоростных железнодорожных магистралей в России и в мире / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, К. М. Сагайдак // Проектирование развития региональной сети железных дорог. — 2019. — № 7. — С. 73–77.
5. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2-х томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др. — М., 2020. — Т. 1. — 2-е изд, перераб и доп.
6. Киселев И. П. Высокоскоростные железные дороги в странах БРИКС / И. П. Киселев, Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Транспорт БРИКС. — 2023. — № 2(4). — С. 1–13.
7. Киселев И. П. Развитие железнодорожного транспорта в новых странах БРИКС / И. П. Киселев, Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман и др. // Транспорт БРИКС. — 2024. — № 3(4). DOI: 10.46684/2024.4.2.
8. Бушуев Н. С. Оценка востребованности высокоскоростной железнодорожной магистрали на полигоне Санкт-Петербург — Москва / Н. С. Бушуев, Д. О. Миненко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2013. — № 2(35). — С. 5–11.
9. Алпысова В. А. Моделирование и прогнозирование пассажиропотока высокоскоростной магистрали на примере поездов «САПСАН» направления Санкт-Петербург — Москва / В. А. Алпысова, Н. С. Бушуев, Д. О. Миненко // Транспорт Урала. — 2014. — № 2(41). — С. 50–53.
10. Бушуев Н. С. Оценка перспектив развития высокоскоростного железнодорожного и авиационного транспорта на направлении Москва — Санкт-Петербург / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2017): материалы Второй международной научно-практической конференции. — 2018. — С. 219–223.
11. Бушуев Н. С. Высокоскоростной железнодорожный транспорт мира в год десятилетия поездов «САПСАН» в России / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, К. М. Сагайдак // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2019): сборник трудов. — 2020. — С. 169–175.
12. Бушуев Н. С. Анализ динамики пассажиропотока поездов «САПСАН» и авиационного транспорта на линии «Москва — Санкт-Петербург» до 2025 г. / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, К. М. Сагайдак // Бюллетень

результатов научных исследований. — 2019. — № 1. — С. 5–14.

13. Бушуев Н. С. Результаты освоения пассажирских перевозок на направлении Москва — Санкт-Петербург в кризисные 2020–2021 годы / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, Н. А. Рочев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — Т. 20. — № 1. — С. 17–27.

14. URL: <https://web.archive.org/web/20110728141420/http://www.uic.org/spip.php?article971>.

15. URL: <https://ria.ru/20230920/stoimost-1897436618.html>.

16. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585>.

17. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6224409>.

18. URL: <https://rg.ru/2023/08/02/minsk-bzhd-uzhe-perevezla-v-soobshchenii-s-rossiej-bolee-15-mln-passazhirov.html>.

19. URL: https://primepress.by/news/kompanii/bzhd_perevezla_bolee_1_5 mln_passazhirov_v_soobshchenii_s_rossiej_za_sem_mesyatsev_2023_g-50254/.

20. URL: <https://tass.ru/ekonomika/21988629>.

21. URL: <https://belta.by/economics/view/avramenko-segodnja-nabljudatsja-znachitelnyj-rost-sprosa-na-aviaperevozki-mezhdu-belarusju-i-rossiej-458635-2021/>.

22. URL: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/passenger-transportation>.

Дата поступления: 04.12.2024

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

БУШУЕВ Николай Сергеевич — канд. техн. наук, доц.;
2009bushuev@rambler.ru

ХРАБРАЯ Мария Сергеевна — студентка;
khrabraya.masha@mail.ru

The Construction of Moscow — Minsk High-Speed Railway and Its Prospects

N. S. Bushuev, M. S. Khrabraya

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Bushuev N. S., Khrabraya M. S. Construction of Moscow — Minsk High-Speed Railway and Its Prospects // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 85–91. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-85-91

Summary

Purpose: To assess the necessity and socio-economic feasibility of building the Moscow — Minsk high-speed railway line (HSL). To analyse the perspective integration of the Moscow — Minsk high-speed railway in the high-speed railway network of the Union States as well as to evaluate its main technical and cost parameters. **Methods:** Review of publications on high-speed railway construction, particularly in Russia; comparative analysis of design solutions for perspective high-speed railway routes in Russia; statistical analysis of actual and prospective passenger traffic volumes. **Results:** Comparative construction costs and length of high-speed railways in the most promising regions of Russia are presented. Moscow — Minsk is the most popular direction of interaction with the Republic of Belarus both economically (production, business, etc.) and socially (cultural and creative ties, tourism, etc.). A significant increase in passenger air transportation has been revealed, which also indicates the demand for the development and improvement of transport links between the capitals of two fraternal states. The growth of JSC “Russian Railways” potential in developing and increasing passenger traffic has been shown. **Practical significance:** The feasibility of building a high-speed railway between Russia and the Republic of Belarus has been demonstrated that would improve and develop their co-operation in various areas of economy and social sphere.

Keywords: High-speed railway (HSR), passenger traffic, HSR construction cost, HSR length, promising HSR directions.

References

1. Bushuev N. S., Shul'man D. O. O perspektivakh razvitiya vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei v Rossii [On the Prospects for the Development of High-Speed Railways in Russia]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results]. 2017, Iss. 3, pp. 7–14. (In Russian)
2. Kiselev I. P., Nazarov O. N. Novye gorizonty vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [New Horizons for High-Speed Rail Transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2018, Iss. 12, pp. 70–76. (In Russian)
3. Bushuev N. S., Shulman D. O., Sagaidak K. M. Modeling of container freight and passenger traffic. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019, 2019, p. 012226.
4. Bushuev N. S., Shul'man D. O., Sagaydak K. M. O proektakh vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei v Rossii i v mire [On high-speed railway projects in Russia and in the world]. *Proektirovanie razvitiya regional'noy seti zheleznykh dorog* [Designing the development of a regional railway network]. 2019, Iss. 7, pp. 73–77. (In Russian)
5. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bryn' M. Ya. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport. Obshchiy kurs: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta v 2-kh tomakh* [High-speed rail transport. General course: a textbook for students of railway transport universities in 2 volumes]. Moscow, 2020, vol. 1, 2nd ed., revised and enlarged. (In Russian)
6. Kiselev I. P., Bushuev N. S., Shul'man D. O. Vysokoskorostnye zheleznye dorogi v stranakh BRIKS [High-speed railways in the BRICS countries]. *Transport BRIKS* [BRICS Transport]. 2023, Iss. 2(4), pp. 1–13. (In Russian)
7. Kiselev I. P., Bushuev N. S., Shul'man D. O. et al. Razvitie zheleznodorozhnogo transporta v novykh stranakh BRIKS [Development of railway transport in the new BRICS countries]. *Transport BRIKS* [BRICS Transport]. 2024, Iss. 3(4). DOI: 10.46684/2024.4.2. (In Russian)
8. Bushuev N. S., Minenko D. O. Otsenka vostrebovannosti vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali na poligone Sankt-Peterburg — Moskva [Assessing the demand for a high-speed railway line on the St. Petersburg — Moscow route]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2013, Iss. 2(35), pp. 5–11. (In Russian)
9. Alpysova V. A., Bushuev N. S., Minenko D. O. Modelirovanie i prognozirovanie passazhiropotoka vysokoskorostnoy magistrali na primere poezdov “SAPSAN” napravleniya Sankt-Peterburg — Moskva [Modeling and forecasting passenger traffic on a high-speed highway using the example of SAPSAN trains on the St. Petersburg — Moscow route]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2014, Iss. 2(41), pp. 50–53. (In Russian)
10. Bushuev N. S., Shul'man D. O. Otsenka perspektiv razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo i aviatsionnogo transporta na napravlenii Moskva — Sankt-Peterburg [Assessment of the development prospects of high-speed rail and air transport on the Moscow — St. Petersburg route]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2017): materialy Vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2017): proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference]. 2018, pp. 219–223. (In Russian)
11. Bushuev N. S., Shul'man D. O., Sagaydak K. M. Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport mira v god desyatiletiya poezdov “SAPSAN” v Rossii [High-speed rail transport of the world in the year of the decade of SAPSAN trains in Russia]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (RILTTRANS-2019): sbornik trudov* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (RILTTRANS-2019): collection of papers]. 2020, pp. 169–175. (In Russian)
12. Bushuev N. S., Shul'man D. O., Sagaydak K. M. Analiz dinamiki passazhiropotoka poezdov “SAPSAN” i aviatsionnogo transporta na linii “Moskva — Sankt-Peterburg” do 2025 g. [Analysis of the dynamics of passenger traffic of SAPSAN trains and air transport on the Moscow —

St. Petersburg line until 2025]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2019, Iss. 1, pp. 5–14. (In Russian)

13. Bushuev N. S., Shul'man D. O., Rochev N. A. Rezul'taty osvoeniya passazhirskikh perevozok na napravlenii Moskva — Sankt-Peterburg v krizisnye 2020–2021 gody [Results of developing passenger transportation on the Moscow — St. Petersburg route during the crisis years of 2020–2021]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 1, pp. 17–27. (In Russian)

14. Available at: <https://web.archive.org/web/20110728141420/http://www.uic.org/spip.php?article971>.

15. Available at: <https://ria.ru/20230920/stoimost-1897436618.html>.

16. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585>.

17. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/6224409>.

18. Available at: <https://rg.ru/2023/08/02/minsk-bzhd-uzhe-perevezla-v-soobshchenii-s-rossiej-bolee-15-mln-passazhirov.html>.

19. Available at: https://primepress.by/news/kompanii/bzhd_perevezla_bolee_1_5 mln_passazhirov_v_soobshchenii_s_rossiej_za_sem_mesyatsev_2023_g-50254/.

20. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/21988629>.

21. Available at: <https://belta.by/economics/view/avramenko-segodnja-nabljudatsja-znachitelnyj-rost-sprosa-na-aviaperevozki-mezhdu-belarusju-i-rossiej-458635-2021/>.

22. Available at: <https://ar2020.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/passenger-transportation>.

Received: December 04, 2024

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Nikolay S. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 2009bushuev@rambler.ru

Maria S. KHRABRAYA — Student; khrabraya.masha@mail.ru

УДК 629.423

Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник»

А. А. Будаев, Е. А. Третьяков

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, Маркса пр., 35

Для цитирования: Будаев А. А., Третьяков Е. А. Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 92–101. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-92-101

Аннотация

Цель: Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) по данным измерительных систем в пути следования, поиска допустимых состояний в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной аналитики. **Методы:** Для решения поставленных задач использовались методы имитационного компьютерного моделирования в среде Matlab Simulink, программирования на языке C#, математической статистики и теории электрической тяги. **Результаты:** Разработана имитационная цифровая модель электрической части грузового электровоза в Matlab Simulink на основе технологии «Цифровой двойник» с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования. Выполнена валидация разработанной имитационной модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей РПДА. Выполнено имитационное моделирование возможной неисправности в электрической части электровоза 2ЭС6 с ее последующим автоматизированным устранением, представлены графики полученных рассчитанных и экспериментальных зависимостей по времени. **Практическая значимость:** Полученные результаты исследования, а именно разработанные имитационные модели электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» могут найти применение с целью генерирования набора данных с различными параметрами движения поезда для машинного обучения модели прогнозирования состояния электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) в рамках разрабатываемой прескриптивной системы автоматического предотвращения неисправностей электроподвижного состава в пути следования.

Ключевые слова: Цифровой двойник, электроподвижной состав, имитационная модель, неисправности, машинное обучение.

Введение

Актуальность создания и применения цифровых двойников на электроподвижном составе подтверждается Паспортом комплексной программы инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. (утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 06.09.2023 № 2274/р).

Вопросами внедрения и применения «цифровых двойников» в производстве и ремонте электроподвижного состава (ЭПС) занимались как

отечественные, так и зарубежные исследователи. В работах Ф. Пайрс, А. Эль Саддик, И. Эрандо-неа, Л. Де Донато и др. [1–4] представлены структурные схемы и информационные связи между отдельными элементами подсистем, раскрывающих суть технологии «Цифровой двойник», а также приведены примеры реализации для тормозного оборудования электровозов. В публикациях И. К. Лакина, А. П. Семенова, А. А. Аболмасова, А. С. Ададунова [5–9] представлены результаты

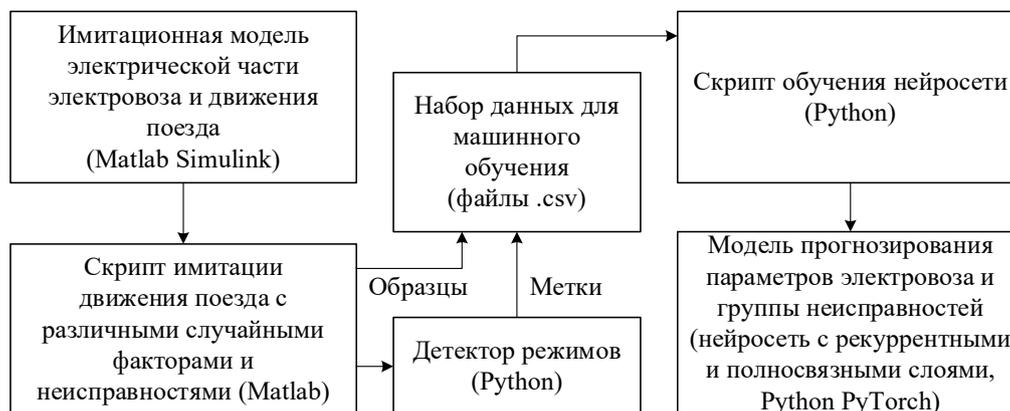


Рис. 1. Структурная схема обучающего модуля

исследований, согласно которым технология «Цифровой двойник» развивается применительно к предиктивной технической диагностике состояния ЭПС для технического обслуживания и текущего ремонта по состоянию с учетом информации с бортовых измерительных систем и статистики ремонта на протяжении всего жизненного цикла. В основе проекта «Умный локомотив» [8, 11–12] находится цифровая модель, которая позволяет проводить мониторинг и прогнозировать техническое состояние некоторых узлов ЭПС.

Анализ опубликованных работ свидетельствует о том, что на данный момент в недостаточной степени рассматриваются вопросы применения технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования (моделирования) параметров ЭПС и сценариев развития ситуаций по данным измерительных систем (ретроспективных и текущих) в пути следования.

Целью данного исследования является моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» для прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) в рамках прескриптивной аналитики.

Основные задачи:

- разработка имитационной цифровой модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 на основе технологии «Цифровой двойник»;

- валидация разработанной имитационной цифровой модели на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей с бортового регистратора параметров движения;

- моделирование возможных неисправностей и параметров движения электровоза с целью последующего формирования набора данных для машинного обучения и поиска допустимых параметров (состояний).

Материалы и методы

В основе цифровой имитационной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6 используются данные с бортового регистратора параметров движения и автоведения (РПДА). Ввиду ограниченного количества файлов РПДА электровозов с неисправностями и различными параметрами движения поезда из реальных поездов необходимым является формирование данных для машинного обучения с помощью разработанной имитационной модели.

Взаимосвязь технологии «Цифровой двойник» электрической части электровоза 2ЭС6 и методов машинного обучения в контексте решаемых задач представлена в виде структурной схемы обучающего модуля (рис. 1).

Данная схема состоит из цифровой имитационной модели электрической части электровоза и движения поезда, а также скрипта, кото-

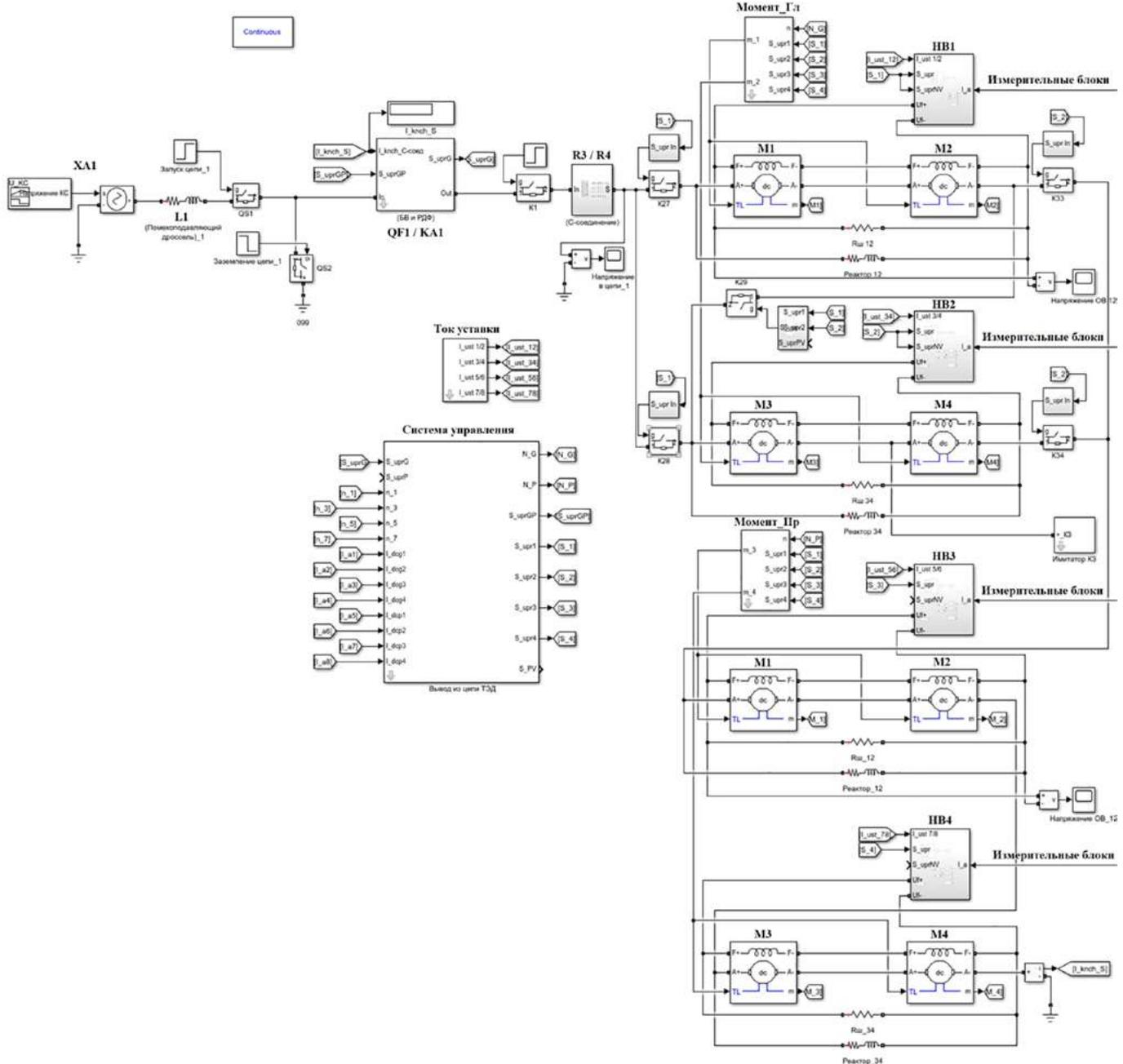


Рис. 2. Имитационная модель электрической части электровоза 2ЭС6

рый осуществляет запуск модели с различными параметрами. Скрипт осуществляет генерацию необходимого количества файлов с записями имитированных поездок в виде зависимостей параметров движения электровоза от общего времени моделирования. Каждый файл помечается меткой (наличие или отсутствие неисправности,

недопустимых состояний), которая определяется с помощью детектора режимов.

В результате машинного обучения формируется модель прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные) по данным измерительных систем в пути следования, поиска допустимых состояний

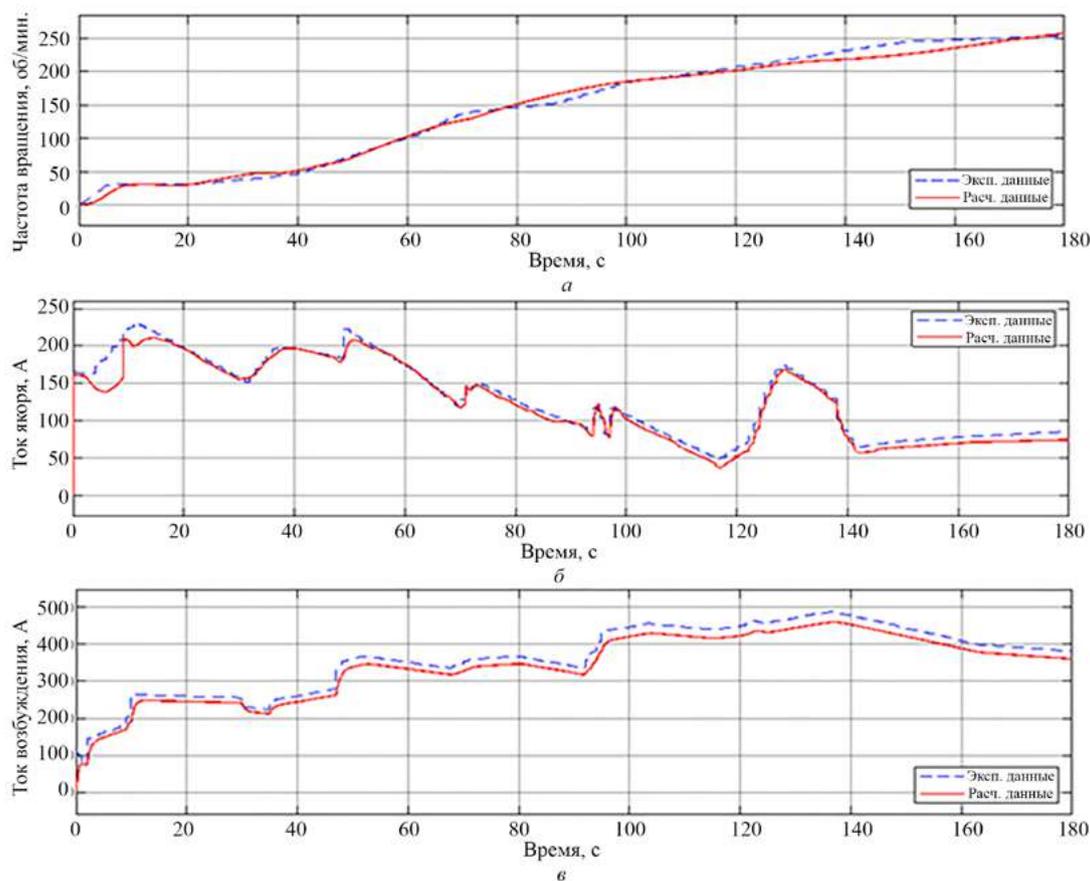


Рис. 3. Параметры ТЭД «М2» (ДПТ2):

a — частота вращения; *б* — ток якоря; *в* — ток возбуждения

в реальном времени на основе моделирования в рамках прескриптивной аналитики.

Разработка имитационной цифровой модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6

Имитационная цифровая модель силовой электрической части электровоза 2ЭС6 реализована в программе Matlab Simulink [13]. В качестве исходных данных используются технические характеристики тягового электродвигателя (ТЭД) ЭДП 810, параметров пусковых, шунтирующих сопротивлений силовой цепи, токов уставок коммутационного оборудования, массивы дискретных данных по времени с бортовых систем РПДА (напряжение на токоприемнике, токи возбуждения ТЭД, позиции переключения пускового реостата, сила тяги).

Имитационная цифровая модель силовой электрической части электровоза 2ЭС6 в программе Matlab Simulink для С-соединения ТЭД представлена на рис. 2.

Пусковой реостат в разработанной модели выполнен в виде подсистемы *R3-R4*, где последовательно соединены резисторы и переключатели. Момент сопротивления на валу ТЭД рассчитывается в подсистеме «Момент_Гл/Пр» на основе расчетной силы тяги, получаемой с РПДА, и тягового расчета. Независимое возбуждение в разработанной модели реализовано в виде подсистемы с обратной связью по току якоря. В подсистеме имеется блок *Matlab Function*, где реализуется следующий закон для регулирования напряжения обмотки возбуждения (ОВ):

$$I_{\text{в}} = I_{\text{в,уст}} + k \cdot I_{\text{я}},$$

где $I_{\text{в,уст}}$ — задаваемый ток уставки возбуждения;
 k — коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря;
 $I_{\text{я}}$ — ток в обмотках якоря ТЭД.

Предусмотрена возможность задания тока возбуждения на основе данных с РПДА.

Для имитационного моделирования возможных неисправностей в электрической части электровоза 2ЭС6 реализованы с помощью нескольких подсистем и блоков функций *Matlab Function*, а также измерительных блоков коммутационные и защитные аппараты: быстродействующий выключатель ВАБ-55 и дифференциальное реле РДЗ-068 ЭТ. В подсистемах «БВ» и «РДФ» прописаны функции, на основе которых происходит срабатывание быстродействующего выключателя (БВ) и дифференциального реле (РДФ) при наличии аварийных режимов.

Валидация разработанной имитационной модели силовой электрической части электровоза 2ЭС6

Валидация разработанной имитационной модели выполнена на основе данных, полученных с РПДА электровоза. В качестве критерия сходимости результатов имитационного моделирования и экспериментальных данных принят коэффициент корреляции Пирсона.

На рис. 3 представлено сравнение результатов имитационного моделирования частоты вращения, токов якоря, возбуждения и измеренных данных РПДА электровоза 2ЭС6 в пути следования на 23 позиции С-соединения ТЭД во временном отрезке 180 с.

Коэффициент корреляции Пирсона между расчетными и экспериментальными данными составил: частота вращения — 99,65 %, ток якоря — 98,54 % и ток возбуждения — 99,61 %.

Анализ сравнения результатов имитационного моделирования и измеренных данных РПДА электровоза 2ЭС6 в пути следования свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Моделирование возможных неисправностей и параметров движения поезда в электрической части электровоза 2ЭС6

Рассмотрим результаты имитационного моделирования короткого замыкания в цепях тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС6 как пример последствий одной из неисправностей в пути следования. В результате описанной неисправности в режиме тяги отключается быстродействующий выключатель со срабатыванием дифференциального реле в секции. Для устранения неисправности в пути следования из силовой электрической цепи выводится неисправная пара ТЭД. Имитация короткого замыкания в электрических цепях, например между ТЭД второй пары головной секции (М3 и М4), выполнена с помощью разработанного блока «Имитатор КЗ». Для вывода из цепи пары ТЭД разработан блок «Вывод из цепи ТЭД». При наличии определенных сигналов от БВ и РДФ в данной подсистеме проводится проверка цепей тяговых электродвигателей, после чего передаются управляющие сигналы на соответствующие контакторы.

После запуска имитационной модели на 65-й секунде происходит короткое замыкание в цепи тяговых электродвигателей. Сигнал о срабатывании быстродействующего выключателя и дифференциального реле *QF1* и *KA1* передается в подсистему «Вывод из цепи ТЭД», где начинается проверка цепей всех ТЭД. При обнаружении короткого замыкания в блоке «Вывод из цепи ТЭД» формируются управляющие сигналы, которые поступают на контакторы «К27-29» и «К33-34» в головной секции электровоза, обеспечивая отключение пары ТЭД (М3 и М4).

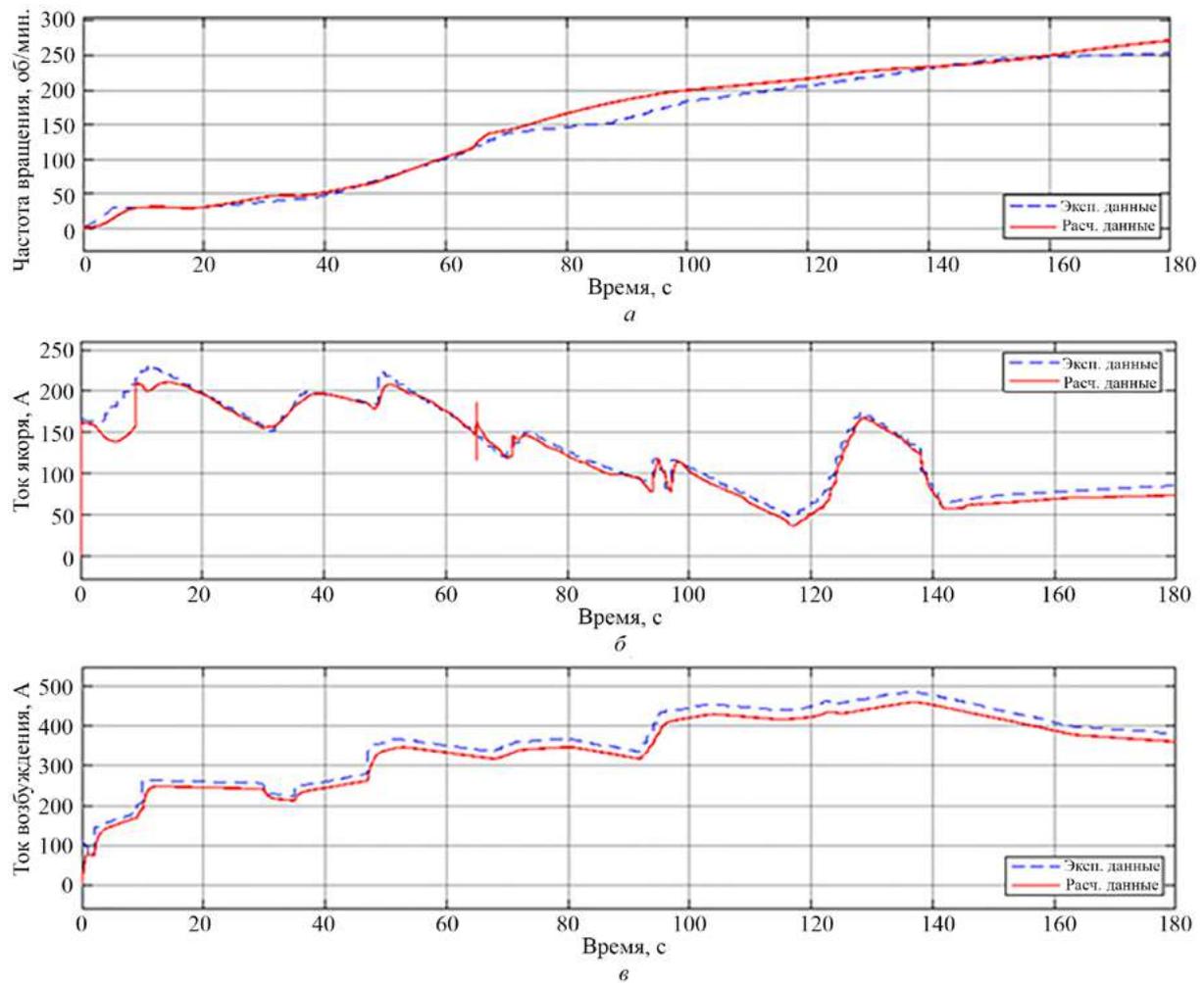


Рис. 4. Параметры исправной пары ТЭД «M1 — M2»:
 а — частота вращения; б — ток якоря; в — ток возбуждения

Результаты и обсуждение

Результаты имитационного моделирования силовой цепи электровоза 2ЭС6 в пути следования при отсутствии и наличии короткого замыкания представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

На 65-й секунде имитационного моделирования на втором двигателе первой пары ТЭД наблюдается бросок тока (рис. 4), обусловленный появлением КЗ в цепи другого ТЭД. После срабатывания блока «Имитатор КЗ» ТЭД M4 отключен от питания (рис. 5). При выводе из цепи пары ТЭД также отключается соответствующий канал статического преобразователя СПП1000 (в данном случае блок «НВ 2»).

Выводы

В результате проведенных исследований разработана имитационная цифровая модель электрической части грузового электровоза в Matlab Simulink на основе технологии «Цифровой двойник» с учетом данных бортовых измерительных систем в пути следования. Выполнена валидация разработанной имитационной модели электрической части электровоза 2ЭС6 на основе ретроспективных данных, полученных после обработки записей РПДА. Коэффициент корреляции Пирсона для всех рассчитанных данных составил более 98 %, что говорит об адекватности модели и ее соответствии реальным параметрам работы электро-

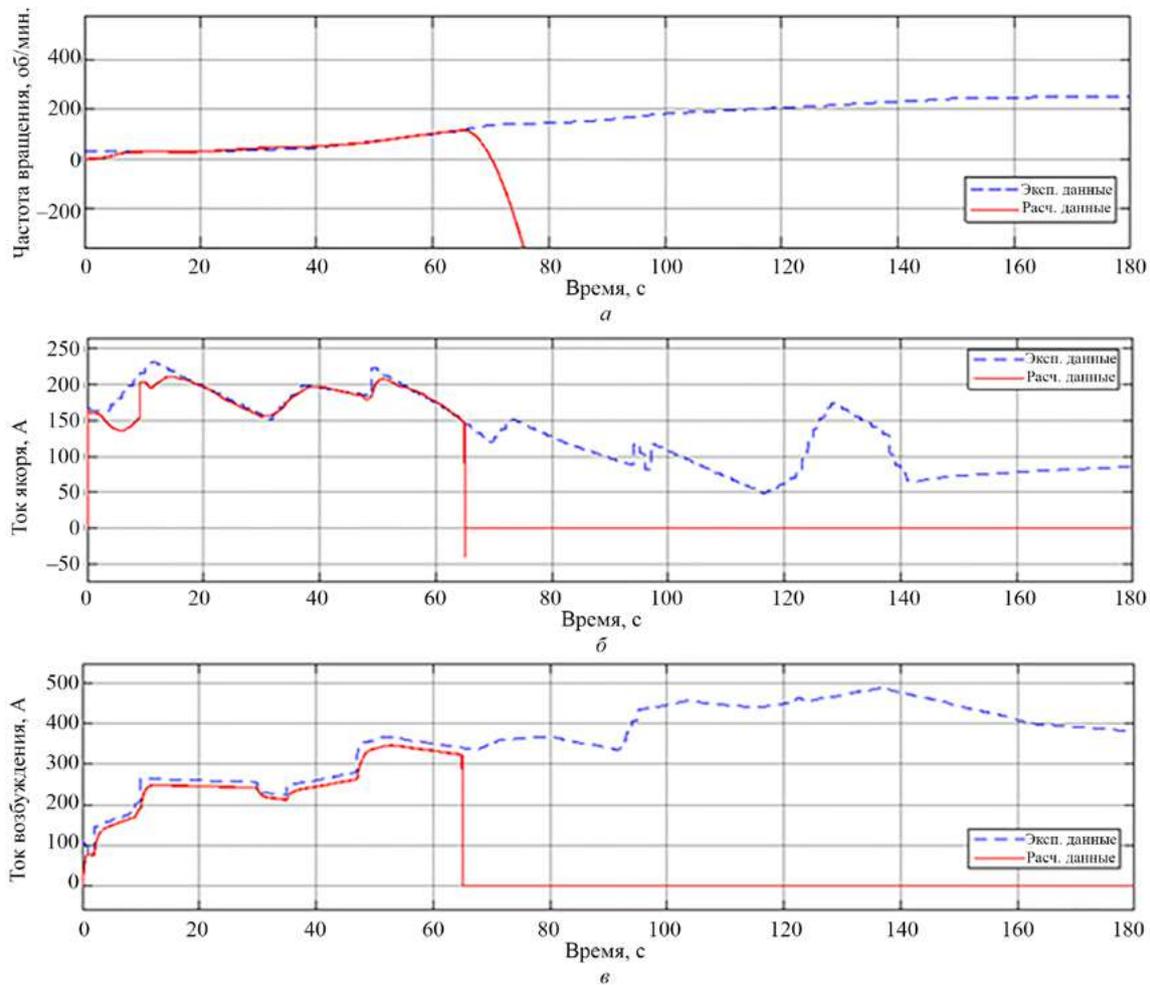


Рис. 5. Параметры неисправной пары ТЭД «М3 — М4»:
 а — частота вращения; б — ток якоря; в — ток возбуждения

воза. Выполнено имитационное моделирование возможной неисправности в электрической части электровоза 2ЭС6 с ее последующим автоматизированным устранением, представлены графики полученных рассчитанных и экспериментальных зависимостей по времени. Сгенерированный набор данных с различными параметрами движения поезда, полученных с помощью представленного имитационного моделирования на основе технологии «Цифровой двойник», может использоваться для машинного обучения модели прогнозирования параметров электровоза и сценариев развития ситуаций (включая аварийные), поиска допустимых состояний в пути следования в рам-

ках прескриптивной аналитики, что и является предметом дальнейших исследований авторов.

Список источников

1. Pires F. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges / F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa et al. // IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). — Helsinki, Finland, 2019. — Pp. 721–726. — DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972134.
2. Errandonea I. Digital twin for maintenance: A literature review / I. Errandonea, S. Beltrán, S. Arrizabalaga // Computers in Industry. — 2020. — Iss. 123. — DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.

3. Ghaboura S. Digital Twin for Rail-way: A Comprehensive Survey / S. Ghaboura, R. Ferdousi, F. Laamarti et al. // IEEE Access. — 2023. — Iss. 11. — Pp. 120237–120257. — DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
4. Donato L. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma et. al. // Journal of Reliable Intelligent Environments. — 2023. — Iss. 9. — Pp. 303–317. DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6.
5. Лакин И. К. Использование технологии «Цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов / И. К. Лакин, А. П. Семенов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 89–98. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89–98.
6. Ададунов А. С. Общие принципы построения предиктивной системы диагностики нового электропоезда ЭС2Г «Ласточка» и первые экспериментальные данные / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. М. Бойко // Национальная Ассоциация Ученых. — 2022. — № 75-2. — С. 14–22.
7. Ададунов А. С. Аппаратно-программный комплекс прескриптивной системы диагностики для электропоезда «Ласточка» / А. С. Ададунов, В. И. Федорова, А. А. Перевязкин // Автоматика, связь, информатика. — 2023. — № 2. — С. 16–19.
8. Аболмасов А. А. Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления / А. А. Аболмасов, Д. О. Лисин, В. А. Мельников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 3(63). — С. 69–75. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75.
9. Хабаров Р. А. Предиктивная диагностика технического состояния деталей, агрегатов и систем подвижного состава / Р. А. Хабаров, М. М. Раевский // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2022. — С. 217–227.
10. Репешко Н. А. Принципы работы «Умного локомотива» / Н. А. Репешко // Транспорт: наука, образование, производство: сборник трудов Международной научно-практической конференции. — Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2018. — Т. 2. — С. 171–174.
11. Иванков Д. О. Принципы работы «Умного локомотива» / Д. О. Иванков, А. А. Понятов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. — Нижний Новгород: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский гос. ун-т путей сообщения» в г. Нижнем Новгороде, 2022. — С. 282–287.
12. Будаев А. А. К вопросу об автоматизации процессов диагностики технического состояния и эксплуатационных показателей электроподвижного состава на основе технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2024. — С. 94–99.
13. Будаев А. А. Принципы построения имитационных моделей электропоездов по технологии «цифровой двойник» / А. А. Будаев, А. Н. Соловьев // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сборник трудов Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. — С. 39–43.

Дата поступления: 09.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

БУДАЕВ Артем Анатольевич — аспирант;
artem.bydaev2@yandex.ru

ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович — д-р техн.
наук, доц.; eugentr@mail.ru

A “Digital Twin”-Based Simulation Model for an Electric Locomotive Electrical Equipment

A. A. Budaev, E. A. Tretyakov

Omsk State Transport University, Russian Federation, 35, Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Budaev A. A., Tretyakov E. A. A “Digital Twin”-Based Simulation Model for an Electric Locomotive Electrical Equipment // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 92–101. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-92-101

Summary

Purpose: To develop a “Digital Twin”-based simulation model for an electric locomotive electrical part for predicting electric locomotive parameters and scenarios (including emergencies) based on en route measurement system data, as well as to define model-based real-time valid parameters within a prescriptive analytics framework. **Methods:** Methods of computer simulation modeling in Matlab Simulink environment, C# programming, mathematical statistics and electric traction theory were used to solve the set tasks. **Results:** The simulation digital model of an electric freight locomotive electrical part in Matlab Simulink based on “Digital Twin” technology has been developed using the on-board measurement system data en route. Validation of the developed simulation model of the 2ES6 electric locomotive electrical part based on retrospective data obtained from processing the RPDA records has been carried out. Fault simulation in the electrical part of the 2ES6 electric locomotive with subsequent fault elimination has been performed, with graphs of calculated and experimental time dependencies obtained and presented. **Practical significance:** The research results obtained, namely the “Digital Twin”-based simulation models of the electric locomotive electrical part can be used for generating different train movement data for computer learning model to predict the electric locomotive parameters and scenarios (including emergencies) within the framework of the developed prescriptive system of automatic electric locomotive fault prevention en route.

Keywords: Digital twin, electric locomotive, simulation model, faults, computer learning.

References

1. Pires F., Cachada A., Barbosa J. et al. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Helsinki, Finland, 2019, pp. 721–726. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972134.
2. Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S. Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 2020, Iss. 123. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.
3. Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F. et al. Digital Twin for Rail-way: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 2023, Iss. 11, pp. 120237–120257. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
4. Donato L., Dirnfeld R., Somma A. et. al. Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2023, Iss. 9, pp. 303–317. DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6.
5. Lakin I. K., Semenov A. P. Ispol’zovanie tekhnologii “Tsifrovoy dvoynik” pri upravlenii remontom lokomotivov [Using the “Digital twin” technology in locomotive repair management]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 89–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89–98. (In Russian)
6. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Boyko A. M. Obshee printsipy postroeniya prediktivnoy sistemy diagnostiki novogo elektropoezda ES2G “Lastochka” i pervye eksperimental’nye dannye [General principles of constructing a predictive diagnostic system for the new ES2G “Lastochka”

electric train and the first experimental data]. *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists]. 2022, Iss. 75-2, pp. 14–22. (In Russian)

7. Adadurov A. S., Fedorova V. I., Perevyazkin A. A. Apparato-programmnyy kompleks preskriptivnoy sistemy diagnostiki dlya elektropoezda “Lastochka” [Hardware and software complex of the prescriptive diagnostic system for the Lastochka electric train]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2023, Iss. 2, pp. 16–19. (In Russian)

8. Abolmasov A. A., Lisin D. O., Mel'nikov V. A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya elektricheskikh mashin lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya [Improving the methods of diagnosing locomotive electric machines based on microprocessor control systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2019, Iss. 3(63), pp. 69–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75. (In Russian)

9. Khabarov R. A., Raevskiy M. M. Prediktivnaya diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya detaley, agregatov i sistem podvizhnogo sostava [Predictive diagnostics of the technical condition of parts, units and systems of rolling stock]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 217–227. (In Russian)

10. Repeshko N. A. Printsipy raboty “Umnogo lokomotiva” [Operating principles of the “Smart Locomotive”]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport: science, education, production: collected works of the International scientific and practical conference]. Rostov-on-Don: Rostovskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2018, vol. 2, pp. 171–174. (In Russian)

11. Ivankov D. O., Ponyatov A. A. Printsipy raboty “Umnogo lokomotiva” [Operating principles of a “Smart Locomotive”]. *Tekhnika i tekhnologii nazemnogo transporta: materialy IV Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-*

prakticheskoy konferentsii [Ground transport engineering and technology: materials of the IV International student scientific and practical conference]. Nizhniy Novgorod: Filial federal'nogo gosdarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya “Samarskiy gos. un-t putey soobshcheniya” v g. Nizhnem Novgorode Publ., 2022, pp. 282–287. (In Russian)

12. Budaev A. A. K voprosu ob avtomatizatsii protsessov diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya i ekspluatatsionnykh pokazateley elektropodvizhnogo sostava na osnove tekhnologii “tsifrovoy dvoynik” [On the issue of automation of diagnostics processes for the technical condition and performance indicators of electric rolling stock based on the “digital twin” technology]. *Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu rossiyskoy nauki* [Innovative projects and technologies in education, industry and transport: materials of the scientific conference dedicated to the Day of Russian Science]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2024, pp. 94–99. (In Russian)

13. Budaev A. A., Solov'ev A. N. Printsipy postroeniya imitatsionnykh modeley elektrovozov po tekhnologii “tsifrovoy dvoynik” [Principles of constructing simulation models of electric locomotives using the “digital twin” technology]. *Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Research and development of rail and road transport: collection of papers of the International scientific and practical conference]. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2024, pp. 39–43. (In Russian)

Received: December 09, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Artyom A. BUDAEV — Postgraduate Student;
artem.bydaev2@yandex.ru

Evgeniy A. TRETYAKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; eugentr@mail.ru

УДК 625.033.34

Анализ влияния эксплуатационных факторов на энергетическую эффективность электромобилей, используемых в производственной деятельности ОАО «РЖД»

Я. В. Популов, А. А. Комяков

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, Омск, Омская обл., 644046, Карла Маркса просп., 35

Для цитирования: Популов Я. В., Комяков А. А. Анализ влияния эксплуатационных факторов на энергетическую эффективность электромобилей, используемых в производственной деятельности ОАО «РЖД» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 102–111. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-102-111

Аннотация

Цель: Проанализировать влияние различных эксплуатационных показателей на расход электроэнергии электромобилями на основе эмпирических данных, полученных в результате опытной эксплуатации. **Методы:** Параметрическая статистика, сравнение эксплуатационных показателей электробусов, анализ аналитических выражений. **Результаты:** Проведено сравнение средних удельных эксплуатационных затрат электромобилей и бензиновых автомобилей. Для кластера поездок в населенном пункте наиболее значимыми влияющими факторами являются пассажирооборот и связанные с ним суточный пробег и количество перевезенных пассажиров. Наблюдается сильная отрицательная связь этих факторов с удельным расходом электроэнергии электромобилем. Увеличение пассажирооборота приводит к росту удельного расхода энергии из-за увеличения массы электробуса, что требует большего расхода энергии на разгон и торможение. **Практическая значимость:** Продемонстрировано влияние факторов на энергетическую эффективность электромобилей, их учет способствует внедрению электромобилей в производственную деятельность ОАО «РЖД».

Ключевые слова: ОАО «РЖД», электромобиль, пассажирооборот, корреляция.

Электрический автомобильный транспорт представляет собой транспортное средство, функционирующее на основе преобразования электрической энергии в механическую, что обеспечивает его движение [1]. Данное определение подчеркивает принципиальные отличия между электромобилями и традиционными автомобилями с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), использующими сжигание углеводородного топлива для создания энергии.

В центре конструкции электромобиля расположен электродвигатель, представляющий собой

достаточно сложный технологический элемент, инициирующий преобразование, как было отмечено выше, электрической энергии, аккумулируемой в батареях, в механическую работу. Литий-ионные аккумуляторы, являемые стандартом в современном электрическом автомобильном транспорте, обладают высокой энергетической плотностью и более длительным сроком службы, что делает их предпочтительными для использования в данной области. Необходимо отметить, что аккумуляторы заряжаются от достаточно широкого спектра различного рода внешних

источников электроэнергии, включая общественные электросети, и как результат могут подвергаться процессам как быстрой, так и медленной зарядки, в зависимости от способов и технологий, используемых в зарядных станциях.

Осуществление функционирования электрического приводного механизма начинается с преобразования электрической энергии, содержащейся в аккумуляторе, в механическую, что достигается при помощи системы управления электродвигателем. Наиболее распространенные типы электродвигателей в современных электрических транспортных средствах — бесщеточные постоянные двигатели (BLDC) и асинхронные двигатели переменного тока, которые, в отличие от топливных аналогов, обеспечивают моментальный крутящий момент и повышенную эффективность, что в конечном итоге положительно сказывается на динамике движения.

Современные электромобили также имплементируют системы рекуперации энергии [2], что позволяет эффективно преобразовывать кинетическую энергию, возникающую при торможении, в электрическую. Рекуперированная энергия возвращается в аккумулятор, что снижает общую потребность в подзарядке и, соответственно, увеличивает ресурс самой батареи. Управление этим процессом осуществляется через сложные контроллеры, которые взаимодействуют с различными датчиками [3], обеспечивая оптимизацию работы системы в зависимости от текущих условий эксплуатации.

По прогнозам экспертов [4–6], к 2025 году общее количество электромобилей в мире составит от 25 до 30 миллионов единиц, что свидетельствует о тенденции снижения доли автомобилей с традиционными двигателями внутреннего сгорания. Бесспорно, электромобили становятся все более популярными в качестве повседневных транспортных средств не только в производственной деятельности отдельных предприятий, но и для частных лиц.

В работе [7] авторы исследовали затраты первичной энергии на протяжении жизненного цикла автомобилей, включая затраты на его производство, эксплуатацию и утилизацию (табл. 1). Результаты исследования показывают, что затраты полной энергии для бензинового автомобиля в 1,87 раза превышают затраты электромобиля, а по энергии, получаемой из ископаемого топлива, это соотношение составляет 2,1 раза. Помимо разницы в объемах потребления энергии, разница в ценах на электроэнергию и жидкое моторное топливо также делает эксплуатационные расходы электромобилей существенно ниже, чем у автомобилей с ДВС.

В статье [8] исследуется вопрос издержек, связанных с выбросами загрязняющих веществ при эксплуатации автомобильного транспорта с различными типами двигателей. Установлено, что «...издержки, обусловленные выбросами парниковых газов от электромобиля на протяжении жизненного цикла, ниже издержек для автомо-

Таблица 1. Затраты первичной энергии на протяжении жизненного цикла электромобилей и бензиновых автомобилей [7]

Потребление	Бензиновый автомобиль	Электромобиль
Полная энергия (кДж/100 км)	421 153,46	224 727,55
Всего ископаемого топлива (кДж/100 км)	392 638,76	190 884,40
Уголь (кДж/100 км)	8134,86	122 974,21
Природный газ (кДж/100 км)	56 852,12	64 132,90
Нефть (кДж/100 км)	327 651,78	3777,29
Вода (л/100 км)	117,09	370,52

Таблица 2. Обоснование выбора эксплуатационных показателей электробусов, влияющих на расход электроэнергии

Показатель	Обоснование
Пробег	Выступает в качестве основной переменной, напрямую влияющей на показатели работы электромобиля, способствуя выявлению закономерности в его расходе. Отметка пройденного расстояния легко измеряема и регулярно фиксируема как отдельный параметр, обеспечивая высокую степень достоверности и последующей сопоставимости данных
Среднее время электробуса в пути	Позволяет проводить сопоставительные исследования между различными периодами и маршрутами, способствуя выявлению закономерностей в работе электробусов и определению факторов, влияющих на их использование
Количество пассажиров	Количество перевезенных пассажиров может повлиять на массу электромобиля, а также на количество остановок в пути следования
Погодные условия (средняя температура воздуха)	Служит основой для сравнения эксплуатационных показателей электробусов в различных климатических условиях, позволяя выявить зависимости между температурными факторами и эффективностью работы электробусов
Пассажирооборот (пасс-км)	Отражает реальную работу электробусов по перевозке пассажиров. Показатель учитывает не только расстояние, пройденное электробусом, но и количество перевезенных пассажиров

бия с ДВС примерно на 70 руб. в расчете на 100 км пробега...».

В работе [9] выполнено сравнение средних удельных эксплуатационных затраты электромобилей и бензиновых автомобилей. Установлено, что эксплуатационные расходы, выраженные в долларах США в расчете на 100 км пробега, для бензиновых автомобилей более чем в 6 раз выше, чем для электромобилей (13,5\$/100 км против 2,07\$/100 км).

ОАО «РЖД» является компанией, которая активно использует автомобили в производственной деятельности. Средний возраст используемых в технологических и общехозяйственных процессах автомобилей составляет 11,9 года, при этом расчетный срок полезного использования авто составляет 12,2 года. Изношенность автомобильного парка ОАО «РЖД» практически составляет 90 %, что предполагает направление инвестиций не только на его обновление, но и разработку пилотных проектов по внедрению более безопасных и экологичных видов автомобильного транспорта — электромобилей [10, 11]. Стратегический план (сценарий, утвержденный в Концепции по развитию производства и использования электрического автотранспорта,

к 2030 году [11]), предусматривающий использование не менее 3000 электромобилей к 2030 году, отражает необходимость поиска экологически чистых и экономически выгодных решений, способных оптимизировать производственные процессы и обеспечить устойчивое развитие транспортной инфраструктуры.

Тем не менее на пути к формированию парка электромобилей ОАО «РЖД» существует несколько препятствий. Наиболее существенный из них — экономический барьер, заключающийся в высокой стоимости автомобилей, в основном вызванной ценами на аккумуляторные батареи. Кроме того, три ключевых технологических ограничения сдерживают более широкий переход в деятельности ОАО «РЖД» на электрический транспорт — недостаточный запас хода электромобилей по сравнению с автомобилями, оснащенными ДВС, недостаточное развитие существующей на текущий момент зарядной инфраструктуры, а также достаточно длительное время, затрачиваемое на процесс зарядки батарей электромобилей.

В качестве объекта исследования принят электробус NEXT Electro, предназначенный для перевозки пассажиров (до 15 человек) и эксплу-

атирующийся на Западно-Сибирской железной дороге. Электромобиль выполнен на платформе ГАЗ и имеет тяговую аккумуляторную батарею емкостью 48 кВт·ч, обеспечивающую запас хода до 140 км.

Для проведения анализа были выбраны несколько факторов, влияющих на энергоэффективность, обоснование выбора представлены в табл. 2.

Значения указанных факторов фиксировались за каждые сутки эксплуатации электромобиля в 2024 г.

В ходе исследования был рассчитан удельный расход электроэнергии электробусов, выраженный в кВт·ч/100 км. Анализ распределения удельного расхода показал, что он близок к нормальному закону распределения (рис. 1). Следовательно, при статистическом анализе можно применять методы параметрической статистики.

За весь период наблюдений было получено 267 значений удельного расхода энергии. Однако с помощью правила «трех сигм» были исключены те значения, которые могли являться промахами. Таким образом, после удаления промахов объем выборки составил 264 значения.

Основные статистические параметры выбранных факторов (после удаления промахов), а также удельного расхода электроэнергии приведены в табл. 3. Нормативный удельный расход электроэнергии в паспортных данных для электромобиля

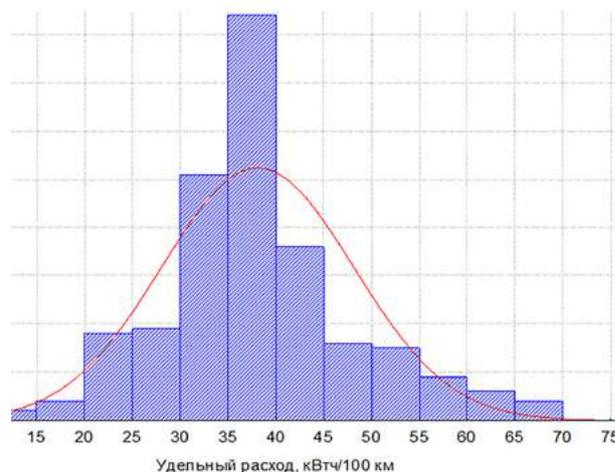


Рис. 1. Гистограмма закона распределения удельного расхода электроэнергии

отсутствует. Однако поиск аналогов в литературе [12] показал, что по результатам испытаний схожих автотранспортных средств удельный расход электроэнергии составил около 39,0 кВт·ч/100 км, что коррелируется с полученными в настоящем исследовании результатами.

Анализ полученных результатов показал, что большая часть поездок выполнена в пределах населенного пункта, так как математическое ожидание средней скорости невелико и составляет 16 км/ч.

В то же время ряд поездок выполнены за пределами населенного пункта (максимальная средняя скорость за поездку составила 62 км/ч).

Таблица 3. Основные статистические параметры

Показатель	Суточный пробег, км	Время в пути, ч	Количество перевезенных пассажиров, чел.	Температура, °С	Пассажирооборот, пасс-км	Средняя скорость, км/ч	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/100 км
Математическое ожидание	35,8	2,5	13,6	10,9	526,5	16,0	38,2
Максимальное значение	202,0	12,0	29,0	29,0	1875,0	62,0	68,2
Минимальное значение	4,0	1,0	0,0	-34,0	31,0	4,0	13,1
Среднее квадратическое отклонение	18,9	1,1	4,2	14,5	311,7	11,8	10,0

В связи с этим целесообразно исходную выборку разделить на два кластера в зависимости от средней скорости движения: движение в населенном пункте; движение вне населенного пункта.

Для оценки степени влияния принятых к рассмотрению факторов на удельный расход электроэнергии рассчитаны коэффициенты корреляции по выражению:

$$r = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{[\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2]}}, \quad (1)$$

где X_i — значение фактора за i -е сутки;

Y_i — значение удельного расхода электроэнергии электромобилем за i -е сутки;

\bar{X} — математическое ожидание (среднее значение) фактора;

\bar{Y} — математическое ожидание (среднее значение) удельного расхода электроэнергии электромобилем.

Корреляционная матрица для кластера поездок в населенном пункте приведена в табл. 4, а вне населенного пункта — в табл. 5.

Количество поездок вне населенного пункта оказалось значительно ниже, чем внутри населенного пункта. Фактор, связанный с количеством пассажиров, оказался постоянным для выборки вне населенного пункта, в связи с чем он не включен в корреляционную матрицу (табл. 5). Жирным шрифтом в табл.4 и 5 выделены значимые коэффициенты корреляции.

Таблица 4. Корреляционная матрица для кластера поездок в населенном пункте

Показатель	Суточный пробег	Время в пути	Количество перевезенных пассажиров	Температура	Пассажирооборот	Удельный расход электроэнергии	Средняя скорость
Суточный пробег	1,000	0,616	0,024	-0,329	0,806	-0,424	0,631
Время в пути	0,616	1,000	-0,087	0,140	0,386	-0,072	-0,137
Количество перевезенных пассажиров	0,024	-0,087	1,000	-0,158	0,548	-0,213	0,084
Температура	-0,329	0,140	-0,158	1,000	-0,371	0,192	-0,616
Пассажирооборот	0,806	0,386	0,548	-0,371	1,000	-0,482	0,612
Удельный расход электроэнергии	-0,424	-0,072	-0,213	0,192	-0,482	1,000	-0,443
Средняя скорость	0,631	-0,137	0,084	-0,616	0,612	-0,443	1,000

Таблица 5. Корреляционная матрица для кластера поездок в населенном пункте

Показатель	Суточный пробег	Время в пути	Температура	Пассажирооборот	Удельный расход электроэнергии	Средняя скорость
Суточный пробег	1,000	0,570	0,529	1,000	0,120	-0,022
Время в пути	0,570	1,000	0,584	0,570	0,879	-0,834
Температура	0,529	0,584	1,000	0,529	0,395	-0,356
Пассажирооборот	1,000	0,570	0,529	1,000	0,120	-0,022
Удельный расход электроэнергии	0,120	0,879	0,395	0,120	1,000	-0,989
Средняя скорость	-0,022	-0,834	-0,356	-0,022	-0,989	1,000

Движение электробуса в населенном пункте

Полученные результаты показывают, что для кластера поездок в населенном пункте наиболее значимыми влияющими факторами является пассажирооборот и связанные с ними суточный пробег и количество перевезенных пассажиров. Наблюдается сильная отрицательная связь этих факторов с удельным расходом электроэнергии электромобилем. Увеличение пассажирооборота приводит к росту удельного расхода энергии из-за увеличения массы электробуса, что требует большего расхода энергии на разгон и торможение. Значимым фактором является средняя скорость движения (коэффициент корреляции $-0,443$). Характер и степень влияния этих факторов для электромобилей схож с автотранспортом на жидком моторном топливе.

Значимым фактором также является температура воздуха, однако коэффициент корреляции является положительным ($0,192$), так как на электробусе NEXT Electro в зимнее время используется жидкостный отопитель на моторном топливе. При этом в летнее время заряд аккумуляторной батареи расходуется на работу системы кондиционирования. В то же время в условиях низких температур эффективность работы аккумуляторов снижается, что приводит к увеличению расхода электроэнергии для поддержания необходимых функциональных параметров. Зависимость удельного расхода энергии от температуры воздуха (w) имеет U -образную форму, что указывает на увеличение расхода как при низких, так и при высоких температурах.

Для дальнейшего рассмотрения принимаются следующие факторы: пассажирооборот (Q), средняя скорость движения (V), температура воздуха (t).

С применением программного комплекса Statistica сформировано уравнение множественной линейной регрессии на основе принятых к рассмотрению факторов:

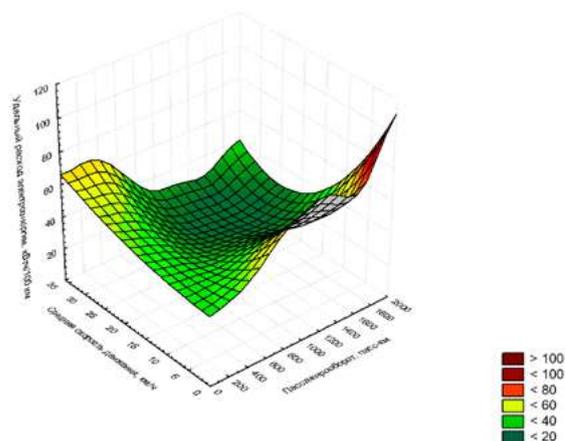


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии электромобилем от средней скорости движения и пассажирооборота (населенный пункт)

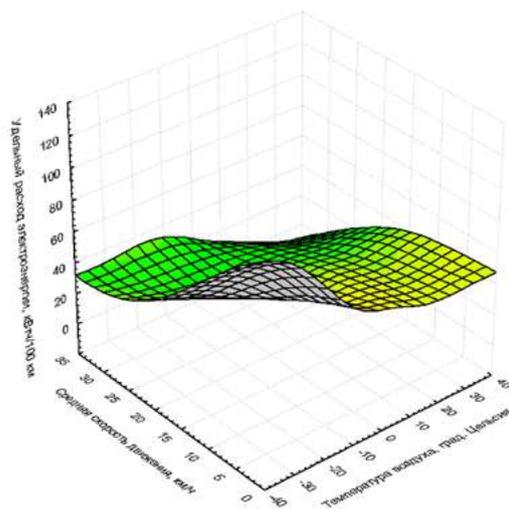


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии электромобилем от средней скорости движения и температуры воздуха (населенный пункт)

$$w = -0,1056t - 0,0109Q - 0,6275V + 53,95. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что качество полученного линейного уравнения регрессии является невысоким (коэффициент детерминации $R^2 = 0,277$), так как влияние принятых к рассмотрению факторов на удельный расход электроэнергии является существенно нелинейным (рис. 2 и 3).

Движение электробуса вне населенного пункта

Для кластера поездок вне населенного пункта значимыми влияющими факторами являются средняя скорость движения и время в пути. Учитывая, что эти факторы являются мультиколлинеарными, к дальнейшему рассмотрению принимается только один фактор — средняя скорость движения (коэффициент корреляции $-0,989$). Зависимость удельного расхода электроэнергии

электромобилем от средней скорости движения приведена на рис. 4.

С применением программного комплекса Statistica сформировано уравнение множественной линейной регрессии:

$$w = -0,899V + 80,197. \quad (3)$$

В данном случае качество уравнения является высоким с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,978$. Как видно из рис. 5, фактические и смоделированные значения удельного

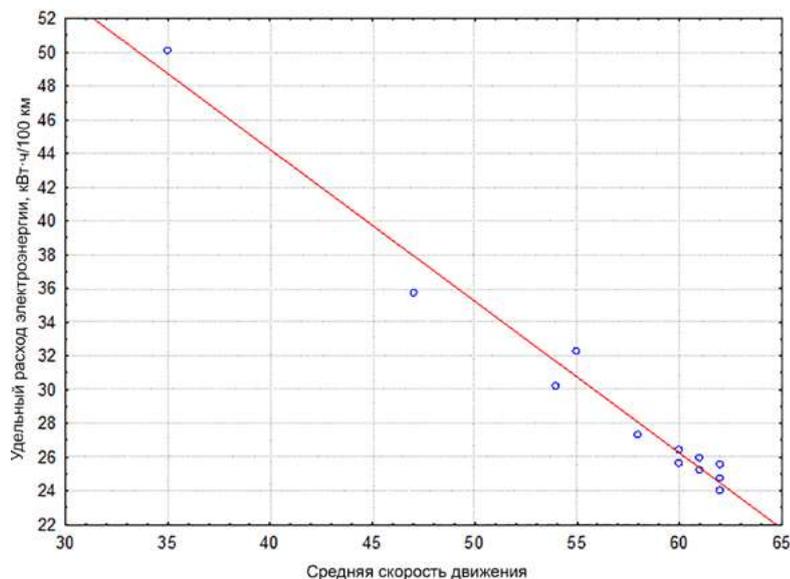


Рис. 4. Зависимость удельного расхода электроэнергии электромобилем от средней скорости движения вне населенного пункта

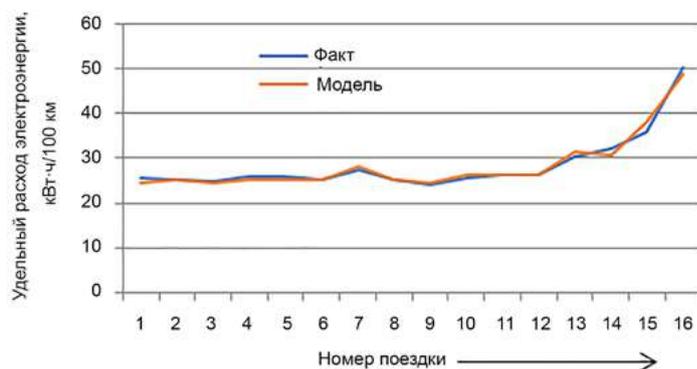


Рис. 5. Фактические и смоделированные значения удельного расхода электроэнергии электромобилем для поездок вне населенного пункта

расхода электроэнергии электромобилем оказываются близкими друг другу (средняя относительная погрешность MAPE составила 2,4 %).

Таким образом, для нормирования удельного расхода электроэнергии для поездок электромобилей вне населенного пункта целесообразно применять традиционные методы, основанные на линейном регрессионном анализе.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. По данным опытной эксплуатации электромобиля установлено, что удельный расход электроэнергии на 100 км пробега распределен по нормальному закону, следовательно, для его анализа можно применять методы параметрической статистики. Математическое ожидание удельного расхода электроэнергии составило 38,2 кВт·ч/100 км, что сопоставимо с результатами, выполненными другими исследователями (39,0 кВт·ч/100 км) для данной категории электромобилей.

2. Выполнена кластеризация поездок на две категории: движение в населенном пункте и вне населенного пункта. При движении в населенном пункте наиболее значимыми фак-

торами, влияющими на энергоэффективность электромобилей, являются пассажирооборот, средняя скорость движения и температура воздуха. Однако влияние этих факторов оказывается существенно нелинейным, в связи с чем применять традиционные методы множественной линейной регрессии для нормирования энергопотребления нецелесообразно (коэффициент детерминации $R^2 = 0,277$).

3. Для кластера поездок вне населенного пункта наиболее значимым влияющим фактором является средняя скорость движения (коэффициент корреляции $-0,989$). Данное влияние является линейным, поэтому для нормирования показателей энергоэффективности электромобилей можно использовать методы линейной регрессии (коэффициент детерминации $R^2 = 0,978$, средняя относительная погрешность $MAPE = 2,4\%$).

Список источников

1. Вараксин Д. А. Особенности конструкции современных электромобилей / Д. А. Вараксин // Знания молодых — будущее России: сборник статей XXI Международной конференции, Киров, 5–7 апреля 2023 года. — Киров: Вятский государственный агротехнологический университет, 2023. — С. 280–283.
2. Шайымов С. С. Рекуперация энергии в современных электромобилях / С. С. Шайымов, Б. Н. Байлиев, Н. М. Реджепов // Символ науки: международный научный журнал. — 2024. — Т. 1. — № 10-1. — С. 93–95.
3. Сафонов З. Ю. Явление рекуперации энергии в электромобилях / З. Ю. Сафонов // Российская наука в современном мире: сборник статей LXIII международной научно-практической конференции, Москва, 15 июля 2024 года. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2024. — С. 55–56.
4. Черников В. А. Настоящее и будущее электромобилей / В. А. Черников, А. С. Зувев, Д. П. Зимин и др. // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 8–9 июня 2021 года. Том Часть II. — Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. — С. 403–410.
5. Поспеева О. Н. Тенденции развития рынка электротранспорта / О. Н. Поспеева, Х. А. Фасхиев // Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика: сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции, Уфа, 27 декабря 2022 года. Том Часть 2. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр “Вестник науки”», 2022. — С. 136–151.
6. Фасхиев Х. А. Рынок электромобилей — рост стабилен / Х. А. Фасхиев // Маркетинг в России и за рубежом. — 2023. — № 2. — С. 92–102.
7. Comparative Analysis of Energy Consumption between Electric Vehicles and Combustion Engine Vehicles in High-Altitude Urban Traffic. — URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/8/355> (дата обращения: 24.04.2024)
8. Барабошкина А. В. Экстернальные издержки от автомобильного транспорта в контексте перехода к низкоуглеродной экономике: российский опыт / А. В. Барабошкина, О. В. Кудрявцева // Вестник Московского университета. — Серия 6. Экономика. — 2023. — № 3. С. 137–156.
9. Electric vs. Gas Cars: Is It Cheaper to Drive an EV? — URL: <https://www.nrdc.org/stories/electric-vs-gas-cars-it-cheaper-drive-ev> (дата обращения: 24.04.2024).
10. Концепция управления и развития автохозяйства ОАО «РЖД», утвержденная ОАО «РЖД» 25.08.2020 № 1303.
11. Популов Я. В. Анализ нормативной базы по использованию электромобилей в России / Я. В. Популов // Экономика и общество: современные исследования и инновационное развитие: материалы всероссийской научно-практической конференции: в 3 частях, Омск, 12–13 декабря 2023 года. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2023. — С. 125–128.
12. Блохин А. Н. Результаты исследования электромобиля на шасси «ГАЗель» / А. Н. Блохин, А. М. Грошев,

Т. А. Козлова и др. // Наука и образование. — 2012. — № 12. — С. 75–106.

Дата поступления: 17.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

ПОПУЛОВ Ян Владимирович — аспирант;

populov_yan@mail.ru

КОМЯКОВ Александр Анатольевич — д-р техн. наук,

проф.; tskom@mail.ru

Analysis of Maintenance Factors Affecting the Energy Efficiency of Electric Vehicles Used In the JSC “Russian Railways” Production Activities

Ya. V. Populov, A. A. Komyakov

Omsk State Transport University, Russian Federation, 35, Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Populov Ya. V., Komyakov A. A. Analysis of Maintenance Factors Affecting the Energy Efficiency of Electric Vehicles Used In the JSC “Russian Railways” Production Activities // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 102–111. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-102-111

Summary

Purpose: To analyze various operational factors affecting an electric vehicle power consumption based on empirical data from pilot operations. **Methods:** Parametric statistics, E-vehicle performance evaluation, and analytics expression analysis have been used. **Results:** The average per unit operation costs of electric vehicles and gasoline ones have been compared. For residential area travel, the most significant factors are passenger turnover and associated with it daily mileage and the number of passengers transported. There is a strong negative correlation between these factors and per unit energy consumption of an electric vehicle. Increased passenger volumes lead to increased per unit energy consumption due to a greater electric vehicle weight that requires more energy for acceleration and braking. **Practical significance:** The factors affecting the electric vehicle energy efficiency have contributed to the adoption of electric vehicles in JSC “Russian Railways” production activities.

Keywords: JSC “Russian Railways”, electric car, passenger turnover, correlation.

References

1. Varaksin D. A. Osobennosti konstruktсии sovremennykh elektromobiley [Design Features of Modern Electric Vehicles]. *Znaniya molodykh — budushchee Rossii: sbornik statey XXI Mezhdunarodnoy konferentsii, Kirov, 5–7 aprelya 2023 goda* [Knowledge of the Young is the Future of Russia: Collection of Articles from the XXI International Conference, Kirov, April 5-7, 2023]. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy agrotekhnologicheskii universitet Publ., 2023, pp. 280–283. (In Russian)

2. Shayymov S. S., Bayliev B. N., Redzhepov N. M. Rekuperatsiya energii v sovremennykh elektromobilyakh [Energy Recovery in Modern Electric Vehicles]. *Simvol nauki: mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal* [Symbol of Science: International Scientific Journal]. 2024, vol. 1, Iss. 10-1, pp. 93–95. (In Russian)

3. Safonov Z. Yu. Yavlenie rekuperatsii energii v elektromobilyakh [Phenomenon of Energy Recovery in Electric Vehicles]. *Rossiyskaya nauka v sovremennom mire: sbornik statey LXIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy*

konferentsii, Moskva, 15 iyulya 2024 goda [Russian Science in the Modern World: Collection of Articles from the LXIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, July 15, 2024.]. Moscow: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Aktual'nost'.RF" Publ., 2024, pp. 55–56. (In Russian)

4. Chernikov V. A., Zuev A. S., Zimin D. P. Nastoyashchee i budushchee elektromobiley [The Present and Future of Electric Vehicles]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Voronezh, 8–9 iyunya 2021 goda. Tom Chast' II* [Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, June 8–9, 2021. Volume Part II]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I Publ., 2021, pp. 403–410. (In Russian)

5. Pospieva O. N., Faskhiev Kh. A. Tendentsii razvitiya rynka elektrotransporta [Electric Transport Market Development Trends]. *Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki: teoriya, tekhnologiya, metodologiya i praktika: sbornik nauchnykh statey po materialam X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ufa, 27 dekabrya 2022 goda. Tom Chast' 2* [Actual Issues of Modern Science: Theory, Technology, Methodology, and Practice: Collection of Scientific Articles Based on the Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Ufa, December 27, 2022. Volume Part 2]. Ufa: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Nauchno-izdatel'skiy tsentr "Vestnik nauki", 2022, pp. 136–151. (In Russian)

6. Faskhiev Kh. A. Rynok elektromobiley — rost stabilen [Electric Vehicle Market — Growth is Stable]. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Marketing in Russia and Abroad]. 2023, Iss. 2, pp. 92–102. (In Russian)

7. Comparative Analysis of Energy Consumption between Electric Vehicles and Combustion Engine Vehicles in High-Altitude Urban Traffic. Available at: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/8/355> (accessed: April 24, 2025).

8. Baraboshkina A. V., Kudryavtseva O. V. Eksternal'nye izderzhki ot avtomobil'nogo transporta v kontekste perekhoda

k nizkouglerodnoy ekonomike: rossiyskiy opyt [External costs of automobile transport in the context of the transition to a low-carbon economy: Russian experience]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika* [Bulletin of Moscow University. Series 6. Economy]. 2023, Iss. 3, pp. 137–156. (In Russian)

9. Electric vs. Gas Cars: Is It Cheaper to Drive an EV? Available at: <https://www.nrdc.org/stories/electric-vs-gas-cars-it-cheaper-drive-ev> (accessed: April 24, 2025).

10. *Kontsepsiya upravleniya i razvitiya avtokhozyaystva OAO "RZhD", utverzhdannaya OAO "RZhD" 25.08.2020 № 1303* [The concept of management and development of the motor transport fleet of JSC Russian Railways, approved by JSC Russian Railways on August 25, 2020, № 1303]. (In Russian)

11. Populov Ya. V. Analiz normativnoy bazy po ispol'zovaniyu elektromobiley v Rossii [Analysis of the regulatory framework for the use of electric vehicles in Russia]. *Ekonomika i obshchestvo: sovremennye issledovaniya i innovatsionnoe razvitie: materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3 chastyakh, Omsk, 12–13 dekabrya 2023 goda* [Economy and Society: Modern Research and Innovative Development: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference: in 3 parts, Omsk, December 12–13, 2023]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2023, pp. 125–128. (In Russian)

12. Blokhin A. N., Groshev A. M., Kozlova T. A. et al. Rezul'taty issledovaniya elektromobilya na shassi "GAZel" [Results of the study of an electric vehicle on the GAZelle chassis]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2012, Iss. 12, pp. 75–106. (In Russian)

Received: December 17, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author's information:

Yan V. POPULOV — Postgraduate Student;
populov_yan@mail.ru

Aleksandr A. KOMYAKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; tskom@mail.ru

УДК 629.4.015

Анализ изменения нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями

А. Н. Савоськин¹, А. А. Чучин¹, А. Н. Калякулин²

¹Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

²Приволжский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В.

Для цитирования: Савоськин А. Н., Чучин А. А., Калякулин А. Н. Анализ изменения нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 112–120. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-112-120

Аннотация

Цель: Определение изменения вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар двухосной тележки локомотива на рельсы из-за развития вращающего момента тяговых электродвигателей, что ухудшает условия сцепления колес с рельсами. Для достижения поставленной цели выполнены: разработка расчетной схемы и определение моментов, возникающих в тяговой передаче при включении в работу тяговых электродвигателей; эти моменты выражены через силы взаимодействия элементов тяговой передачи, которые перенесены на раму тележки и на оси колесных пар; определение изменения вертикальных сил, передаваемых от каждой колесной пары на рельсы из-за действия вращающих моментов тяговых электродвигателей. **Методы:** Применение законов теоретической механики; составление и решение уравнений равновесия. **Результаты:** В двухосной тележке локомотивов первая по ходу движения колесная пара разгружается, а вторая догружается на такую же величину. В частности, для электровозов 2(3)ЭС5К такое перераспределение вертикальных нагрузок составит 3,1 % от нагрузки на ось. **Практическая значимость:** Результаты работы представляют интерес для разработки систем автоматического управления сцеплением колесных пар локомотивов с рельсами.

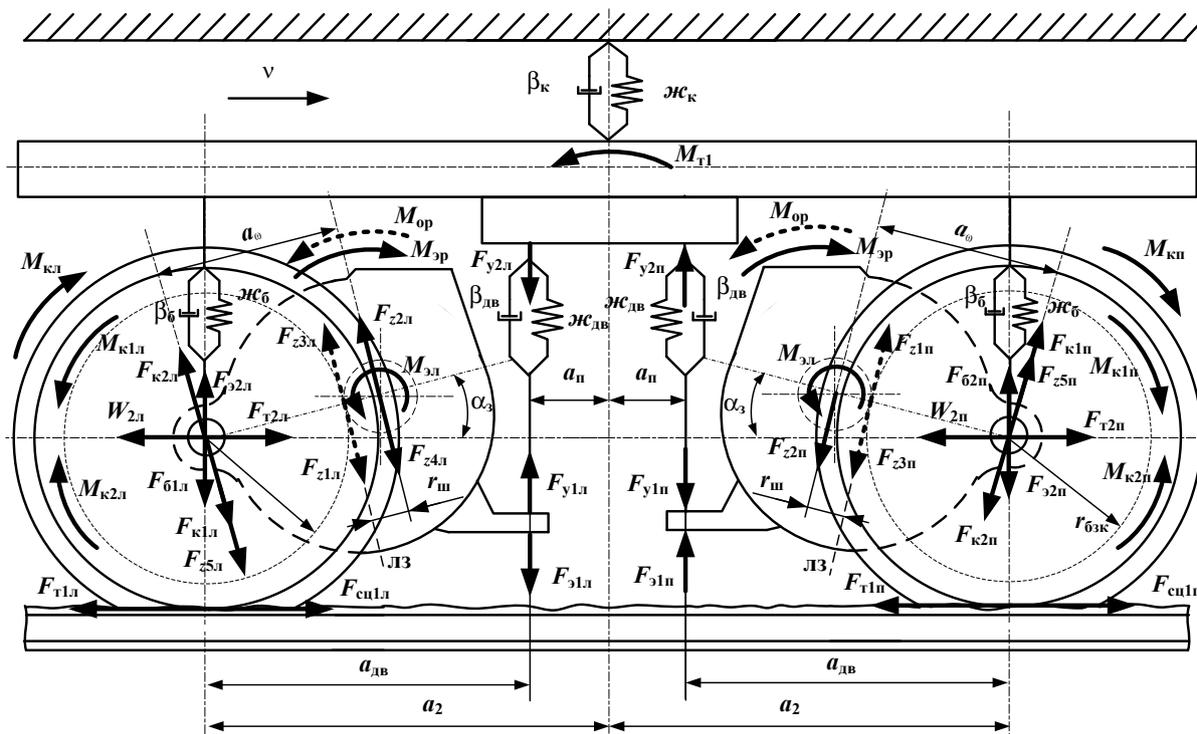
Ключевые слова: Электровоз, колесная пара, нагрузка от колесной пары на рельсы, буксование, вращающий момент тягового электродвигателя.

Введение

В соответствии с общими техническими требованиями, предъявляемыми к локомотивам, эксплуатирующимся в Российской Федерации, расчетная нагрузка от колесной пары локомотива должна обеспечивать соответствие показателей, характеризующих допустимое его воздействие на железнодорожный путь. В частности, относительная разность нагрузок по колесам колес-

ных пар локомотива должна быть не более 4 %, а относительная разность нагрузок по осям в одной тележке и по сторонам локомотива или его секции должна быть не более 3 % [1, 2].

В статическом состоянии локомотива эти требования выполняются путем регулировки рессорного подвешивания, однако при трогании локомотива с места возникает изменение нагрузок, передаваемых от колесных пар на рельсы.



Силы и моменты, действующие на двухстороннюю тяговую передачу двухосной тележки

Экспериментальное исследование данного явления показало, что наибольшая величина изменений нагрузок зависит от величины реализуемой силы тяги и может достигать 20 %. Изменение нагрузок в первую очередь обусловлено реализацией вращающего момента тяговыми электродвигателями (ТЭД), а также тем, что сила тяги локомотива F_k передается на поезд через автосцепки, расположенные ниже центра масс кузова, что приводит к появлению момента, вызывающего поворот кузова, сопровождающийся разгрузкой передней и догрузкой задней тележек. Все это вместе взятое приводит в конечном итоге к разгрузке передних осей тележек и догрузке задних, что вызывает ухудшение условий сцепления передних колесных пар с рельсами.

В настоящее время проводится большое количество научных исследований, направленных на предотвращение буксования путем разработки способов его обнаружения и разработке устройств защиты [3–10], а также совершенство-

вания систем пескоподачи локомотивов [11–13]. Однако являются неисследованными процессы изменения вертикальных нагрузок, передаваемых от колесных пар локомотива на рельсы при развитии вращающего момента тяговыми электродвигателями, а также при развитии силы тяги с учетом различных схем продольных связей тележек с кузовом.

Определение моментов и сил, действующих в расчетной схеме двухосной тележки при реализации вращающего момента тяговыми электродвигателями

В настоящей статье ограничимся рассмотрением явлений, возникающих при реализации вращающего момента тяговыми двигателями двухосной тележки электровоза. Для этого рассмотрим силы и моменты, действующие на элементы тягового привода (рисунок) в режиме трогания электровоза с места. На валах ТЭД при этом создаются электромагнитные моменты $M_{\alpha 1} = M_{\alpha 2} = M_{\alpha}$,

направленные против часовой стрелки. Их появление сопровождается возникновением реактивного момента $M_{эп}$, приложенного к остову каждого ТЭД и направленного по часовой стрелке.

Моменты передаются на шестерни (Ш) редукторов соответствующих ТЭД и далее через большие зубчатые колеса (БЗК) на оси колесных пар. Заменяем эти моменты парами сил, которые равны:

$$\frac{|F_{z1п,л}| = |F_{z2п,л}| = M_{э}}{2r_{ш}}, \quad (1)$$

где $r_{ш}$ — радиус шестерни, а цифра «2» учитывает, что ТЭД электровоза имеют двухстороннюю тяговую передачу.

При этом силы $F_{z1п,л}$, приложенные от зубьев Ш к зубьям БЗК, направлены по линии зацепления ЛЗ, имеют разные знаки: $F_{z1п} = -F_{z1л}$. Силы $F_{z2п,л}$ приложены от шестерен к корпусу редуктора через подшипники этих шестерен так, что $F_{z2л} = -F_{z2п}$.

При действии сил F_{z1} от Ш на зубья БЗК в последних возникают силы реакции $F_{z3п,л}$, приложенные от зубьев БЗК к зубьям Ш и также направленные в разные стороны на правой и левой колесных парах: $F_{z3л} = -F_{z3п}$.

Реактивный момент $M_{эп} = -M_{э}$ заменим парами сил $-F_{э1л}$ и $F_{э2л}$, а также $F_{э1п}$ и $-F_{э2п}$. Силы $-F_{э1л}$ и $F_{э1п}$ приложены от кронштейнов ТЭД к пружинам подвески двигателей, и при этом сила $F_{э1п}$ направлена вверх, а сила $-F_{э1л}$ направлена вниз. В отличие от этого, силы $F_{э2л}$ и $-F_{э2п}$, приложенные от остовов ТЭД к осям колесных пар, направлены противоположно:

$$-F_{э1л} = F_{э1п} = F_{э2л} = -F_{э2п} = \frac{M_{э}}{a_{дв}}. \quad (2)$$

Под действием силы $F_{э1п}$ пружина подвески правого ТЭД к раме тележки сжимается и передает реакцию $-F_{y1п}$ на кронштейн подвески,

направленную вниз, и реакцию $F_{y2п}$ на раму тележки, направленную вверх. В отличие от этого, пружина подвески левого ТЭД растягивается и образует аналогичные реакции с противоположными знаками: $F_{y1л}$ и $-F_{y2л}$.

Силы $F_{э1п}$ и $-F_{y1п}$, а также $-F_{э2п}$ и $F_{y1л}$ компенсируются, а силы $F_{y2п}$ и $-F_{y2л}$ образуют пару сил с моментом:

$$M_{т1} = 2F_{y2п,л}a_{п} = \frac{2M_{э}a_{п}}{a_{дв}}. \quad (3)$$

Этот момент стремится повернуть раму тележки против часовой стрелки и вызывает изменение прогиба пружин буксового подвешивания. Правая буксовая пружина распрямляется, а левая — сжимается, и возникают реакции этих пружин $-F_{б1л}$ и $F_{б2п}$:

$$-F_{б1п} = F_{б2п} = \frac{M_{т1} M_{э} a_{п}}{2a_2 = a_2 a_{дв}}. \quad (4)$$

При этом сила $F_{б2п}$, направленная вверх, приложена от пружины к оси колесной пары и вызывает разгрузку первой оси на величину, определяемую формулой (3), а сила $-F_{б1л}$, направленная вниз, вызывает догрузку второй оси на эту же величину.

Определение сил, действующих на правую и левую колесные пары тележки

Пользуясь принципами теоретической механики, перенесем силы $F_{z3п,л}$ на оси колесных пар, обозначив их $F_{к2п,л}$. Эти силы будут равны:

$$-F_{к2п} = F_{к2л} = F_{z3п,л} = \frac{M_{э}}{2r_{ш}}. \quad (5)$$

Прибавим моменты $M_{к1п,л} = F_{z3п,л}r_{бзк}$ от сил F_{z3} :

$$M_{к1п,л} = F_{z3п,л}r_{бзк} = 0,5\mu M_{э}, \quad (6)$$

где $r_{бзк}$ — радиус большого зубчатого колеса;

μ — передаточное отношение редуктора:

$$\mu = \frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}}.$$

Силы $F_{\text{к2п, л}}$ приложены от больших зубчатых колес к оси колесной пары и уравниваются реактивными силами $F_{\text{к1п, л}} = -F_{\text{к2п, л}}$, приложенными от оси к большим зубчатым колесам. С учетом (1) и (3) силы $F_{\text{к1п, л}}$ будут равны:

$$F_{\text{к2п, л}} = -F_{\text{к1п, л}} = F_{\text{з3п, л}} = \frac{M_{\text{э}}}{2} r_{\text{ш}}. \quad (7)$$

Пары сил $F_{\text{к2п, л}}$ и $F_{\text{з1п, л}}$ создают моменты

$$M_{\text{к2п, л}} = -M_{\text{к1п, л}} = F_{\text{з3п, л}} r_{\text{бзк}} = -0,5\mu M_{\text{э}}. \quad (8)$$

Поскольку моменты $M_{\text{к2п, л}}$ создаются в каждом редукторе, то общий момент $M_{\text{кп, л}}$, вращающий колесные пары по часовой стрелке, будет равен:

$$M_{\text{кп, л}} = 2M_{\text{к2п, л}} = \mu M_{\text{э}}. \quad (9)$$

Так как силы $F_{\text{к2п, л}}$ приложены от больших зубчатых колес каждого редуктора к оси колесной пары, то в сумме на каждую ось будут действовать силы:

$$|F_{\text{о1п, л}}| = 2|F_{\text{к2п, л}}| = \frac{M_{\text{э}}}{r_{\text{ш}}}. \quad (10)$$

При этом сила $F_{\text{о1п}}$ имеет знак минус и направлена вниз, следовательно, она догружает правую колесную пару. Вместе с тем сила $F_{\text{о1л}}$ имеет знак плюс и направлена вверх, следовательно, она разгружает левую колесную пару.

Момент $M_{\text{кп, л}}$ заменим парой горизонтальных сил $F_{\text{т1п, л}}$ и $F_{\text{т2п, л}}$, приложенных к каждому колесу колесной пары:

$$F_{\text{т2п, л}} = -F_{\text{т1п, л}} = \frac{M_{\text{к}}}{r_{\text{кп}}} = \frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}}, \quad (11)$$

где $r_{\text{кп}}$ — радиус колесной пары по кругу катания.

При этом силы $-F_{\text{т1п, л}} = -\frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}}$ приложены

от колес к рельсам в точках их контакта и направлены назад по ходу движения, а силы

$$F_{\text{т2п, л}} = \frac{M_{\text{э}}\mu}{r_{\text{кп}}} \text{ — в точках крепления оси колес-$$

ной пары к раме тележки и направлены по ходу движения.

Силы $F_{\text{т1п, л}}$ уравниваются реакциями рельсов на колесо — силами сцепления $F_{\text{сч1п, л}}$, которые называют касательными силами тяги. Силы $F_{\text{т2п, л}}$ уравниваются сопротивлениями движения поезда $W_{\text{о2п, л}}$, приведенными к одному колесу колесной пары локомотива.

Силы $F_{\text{з2п, л}}$, приложенные через подшипники от шестерен левого и правого редукторов к корпусу редуктора, уравниваются силами $F_{\text{з4п, л}}$, приложенными от корпуса редуктора к оси ТЭД. Перенесем силы $F_{\text{з4п, л}}$ на ось колесной пары, обозначив их через $-F_{\text{з5п, л}}$, и добавим реактивный момент $M_{\text{ор}}$, направленный против часовой стрелки:

$$M_{\text{ор}} = F_{\text{з5п, л}} a_{\omega} = \frac{M_{\text{э}} a_{\omega}}{2r_{\text{ш}}}. \quad (12)$$

Силы $F_{\text{з5п, л}}$, приложенные от корпуса редуктора к оси колесной пары, в соответствии с (1) будут равны:

$$F_{\text{з5п}} = -F_{\text{з5л}} = F_{\text{з2п, л}} = \frac{M_{\text{э}}}{2r_{\text{ш}}}. \quad (13)$$

Таким образом, силы $F_{\text{з5п}}$ разгружают правую колесную пару, а поскольку на оси имеются два редуктора, то эта разгрузка составит:

$$F_{\text{о2п}} = 2F_{\text{з5п}} = \frac{M_{\text{э}}}{r_{\text{ш}}}. \quad (14)$$

В то же время силы $F_{\text{з5л}}$ догружают левую колесную пару на такую же величину:

$$-F_{o2л} = -2F_{z5л} = -\frac{M_э}{r_{ш}}. \quad (15)$$

Таким образом, в соответствии с (2), (4), (8), (10) и (11) на колесные пары тележки действуют следующие силы, с учетом изменения (2, 3, 4) формул (вместо a_{ω} , в знаменателе $a_{дв}$):

– на правую:

$$-F_{э2п} = -\frac{M_э}{a_{дв}}, \quad (16)$$

$$F_{62п} = \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}, \quad (17)$$

$$-F_{o1п} = \frac{-M_э}{r_{ш}}, \quad (18)$$

$$F_{o2п} = \frac{M_{эл}}{r_{ш}}; \quad (19)$$

– на левую:

$$F_{э2л} = \frac{M_э}{a_{дв}}, \quad (20)$$

$$-F_{61л} = \frac{-M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}, \quad (21)$$

$$F_{o1л} = \frac{M_э}{r_{ш}}, \quad (22)$$

$$-F_{o2л} = \frac{-M_{эл}}{r_{ш}}. \quad (23)$$

Определение нагрузок, передаваемых от каждой колесной пары на рельсы

Найдем проекции на ось z сил, приложенных к осям колесных пар. Равнодействующие этих сил соответствуют изменениям нагрузок $2П$, передаваемых от каждой колесной пары на рельсы. Обозначим эти изменения нагрузок $\Delta П_{п1}$ для правой колесной пары и $\Delta П_{л1}$ для левой.

Параметры механической части электровоза 2(3) ЭС5К

	Обозначение	Значение	Размерность
Справочные значения из инструкции по эксплуатации	μ	88/21 = 4,19	—
	$r_{кп}$	0,625	м
	$2a$	2,9	м
Вычисленные с чертежей тележки и колесной пары	α_{ω}	0,604	м
	$a_{дв}$	~ 1,160	м
	$r_{бзк}$	~ 0,49	м
	$r_{ш}$	~ 0,117	м
	$a_{п}$	~ 0,29	м
	α_3	~ 30	град.
	$\cos \alpha_3$	0,866	—

Тогда изменение нагрузки оси левой колесной пары будет равно:

$$\Delta П_{л1} = \frac{M_э}{a_{дв}} - \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}} + \left(\frac{M_э}{r_{ш} - \frac{M_э}{r_{ш}}} \right) \cos \alpha_3 =$$

$$= \frac{M_э}{a_{дв}} - \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}. \quad (24)$$

$$\Delta П_{п1} = -\frac{M_э}{a_{дв}} + \frac{M_э a_{п}}{a_2 a_{дв}}. \quad (25)$$

Таким образом, выполняется условие:

$$\Delta П_{п1} = -\Delta П_{л1}. \quad (26)$$

Это означает, что величина разгрузки правой колесной пары равна величине догрузки левой и эти величины можно обозначить как $\pm \Delta П_{\Sigma}$, где знак «плюс» относится к левой колесной паре, а знак «минус» — к правой.

Примем, что при трогании с места максимальное значение момента $M_э$ определяется моментом $M_{снб}$ от максимальной силы сцепления колес локомотива с рельсами, где ψ_6 — максимальное значение коэффициента сцепления, которое принимается равным $\psi_6 = 0,3$.

Приравнивая значения моментов с учетом передаточного отношения $\mu = \frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}}$, запишем:

$M_3 \mu = \psi_6 2\Pi r_{\text{кп}}$. Отсюда:

$$M_3 = \psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}}}{\mu} = \psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}}. \quad (27)$$

Подставим это выражение M_3 в формулы (26) и (27):

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_{\Sigma} &= \pm\psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \left[\frac{1}{2a_{\omega}} - \frac{a_{\text{п}}}{a_2 a_{\omega}} + \left(\frac{r_{\text{бзк}}}{r_{\text{ш}}} - \frac{1}{r_{\text{ш}}} \right) \cos \alpha_3 \right] = \\ &= \pm\psi_6 2\Pi \frac{r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \frac{a_2 r_{\text{ш}} - 2r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + 2a_2 a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \cos \alpha_3}{2a_2 a_{\omega}} = \\ &= \pm\psi_6 2\Pi \times \\ &\times \frac{r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \frac{-2r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + a_2 [r_{\text{ш}} + 2a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \cos \alpha_3]}{2a_2 a_{\omega}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Разделим эту формулу на 2Π и запишем выражения для изменения нагрузок колесных пар в процентах:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Pi_{\Sigma}}{2\Pi} 100\% &= \pm \frac{\psi_6 r_{\text{кп}}}{r_{\text{бзк}}} \times \\ &\times \frac{-r_{\text{ш}} a_{\text{п}} + a_2 [r_{\text{ш}} + 2a_{\omega} (r_{\text{бзк}} - 1) \alpha_3]}{2a_2 a_{\omega}} 100\%. \end{aligned} \quad (29)$$

Определим величины изменения нагрузок колесных пар по формуле (29) для электровоза 2(3) ЭС5К, параметры которого приведены в таблице.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\Pi_{\Sigma}}{2\Pi} 100\% &= \pm\psi_6 \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \left(\frac{1}{a_{\text{дв}}} - \frac{a_{\text{п}}}{a_2 a_{\text{дв}}} \right) 100\% = \\ &= \pm\psi_6 \frac{r_{\text{кп}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{бзк}}} \left(\frac{a_2 - a_{\text{п}}}{a_2 a_{\text{дв}}} \right) 100\% = \\ &= \pm 0,045 \left(\frac{1,45 - 0,29}{1,45 \cdot 1,16} \right) 100\% = \pm 3,1\%. \end{aligned}$$

Выводы

1. При развитии силы тяги тяговыми электродвигателями локомотивов происходит перераспределение вертикальных нагрузок, передаваемых от колес на рельсы.

2. Если принять, что при трогании развивается максимальная сила тяги, соответствующая значению коэффициента сцепления колес с рельсами, равному 0,3, то в двухосной тележке первая по ходу движения колесная пара разгружается на 3,1%, а вторая догружается на такую же величину.

3. Аналогичные расчеты по перераспределению вертикальных нагрузок от колес на рельсы необходимо выполнить и для трехосных тележек локомотивов, а также для учета влияния поворота кузова при передаче силы тяги от локомотива к поезду.

Список источников

1. ГОСТ Р 55364—2012. Электровозы. Общие технические требования.
2. ГОСТ Р 55050—2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний.
3. Грачев В. В. Интеллектуальная система обнаружения боксования колесных пар в тяговом приводе постоянного тока / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, В. А. Кручек и др. // Электротехника. — 2019. — № 10. — С. 17–23.
4. Патент на полезную модель № 40278 U1 Российская Федерация, МПК В61С 15/12, В60L 3/10. Электронная система защиты от боксования и юза электровоза с плав-

ным зонно-фазовым регулированием напряжения: № 2004111157/22: заявл. 13.04.2004: опубл. 10.09.2004 / В. Н. Лисунов, Н. В. Есин; заявитель Омский государственный университет путей сообщения.

5. Колпахчян П. Г. Совершенствование системы защиты от юза пассажирского электровоза / П. Г. Колпахчян, В. Е. Андреев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 2. — С. 100–113. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113.

6. Патент № 2811618 С1 Российская Федерация, МПК В60L 3/10, В60L 15/20, В61С 15/08. Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2022130451: заявл. 23.11.2022: опубл. 15.01.2024 / И. Р. Харисов, Д. Э. Лимонов, К. Р. Коробицын; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Уральские локомотивы».

7. Литовченко А. Г. Противобоксовочная защита тягового подвижного состава / А. Г. Литовченко, В. В. Литовченко // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 года / Под редакцией И. К. Лакина. — Красноярск: Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», 2020. — С. 208–215.

8. Космодамианский А. С. Разработка устройств предотвращения боксования локомотива на основе объектного моделирования технических решений / А. С. Космодамианский, С. И. Баташов, Е. В. Николаев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. — 2022. — № 4(18). — С. 79–86. — DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-79-86.

9. Воробьев В. И. Анализ способов обнаружения боксования локомотива / В. И. Воробьев, С. Н. Злобин, О. В. Измеров и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2022. — № 6(356). — С. 14–22. — DOI: 10.33979/2073-7408-2022-356-6-14-22.

10. Патент № 2702549 С1 Российская Федерация, МПК В60L 3/10, В61С 15/08, В60L 15/20. Способ обна-

ружения боксования и юза колес транспортного средства с электрической передачей: № 2018144759: заявл. 17.12.2018: опубл. 08.10.2019 / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава».

11. Круглов С. П. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2021. — № 2(70). — С. 104–112. — DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112.

12. Патент № 2780751 С1 Российская Федерация, МПК В61С 15/10, В60В 39/04. Способ адаптивного управления автоматической подачей песка под колеса локомотива: №2022104845: заявл. 22.02.2022: опубл. 30.09.2022 / С. П. Круглов, С. А. Исупов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения.

13. Коновалов П. Ю. Совершенствование пневматической системы пескоподачи электровозов внедрением дросселирующих устройств с сервоприводом / П. Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 1(77). — С. 25–33.

Дата поступления: 30.12.2024

Решение о публикации: 31.01.2025

Контактная информация:

САВОСЬКИН Анатолий Николаевич — д-р техн. наук, проф.; elmechtrans@mail.ru

ЧУЧИН Антон Александрович — канд. техн. наук, доц.; chuchin_anton@mail.ru

КАЛЯКУЛИН Алексей Николаевич — канд. техн. наук; alexeiruz@yandex.ru

Analysis of the Load Transmission from the Locomotive Two-Axle Bogie Wheels to the Rails at the Torque Development in a Traction Motor

A. N. Savoskin¹, A. A. Chuchin¹, A. N. Kalyakulin²

¹Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

²Volga State University of Railway Engineering, 2V, Svobody str., Samara, 443066, Russian Federation

For citation: Savoskin A. N., Chuchin A. A., Kalyakulin A. N. Analysis of the Load Transmission from the Locomotive Two-Axle Bogie Wheels to the Rails at the Torque Development in a Traction Motor // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 112–120. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-112-120

Summary

Purpose: To determine vertical load changes transmitted from two-axle locomotive bogie wheel-sets to the rails at the torque development in traction electric motors that deteriorate the wheel-rail adhesion. To achieve the set goal, a design model have been performed and the starting torque developing during the electric motor traction transmission have been defined. This torque is expressed through the interaction forces of the traction elements transferred to the bogie frame and to the wheelset axles. To determine the vertical force changes from each wheelset to the rails due to the action of the traction motor torque. **Methods:** Application of the theoretical mechanics laws; formulation and solution of equilibrium equations. **Results:** In a locomotive two-axle bogie, consecutive wheels bear contrarily directed loads of the same magnitude. Particularly, for 2(3) *ES5K* electric locomotives, such redistribution of vertical loads will amount to 3.1% of the axle load. **Practical significance:** The research results can be used for the development of automatic control systems for wheel-rail adhesion.

Keywords: Electric locomotive, wheelset, wheelset-rail load, slipping, traction motor torque.

References

1. *GOST R 55364—2012. Elektrovozy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 55364—2012. Electric locomotives. General technical requirements]. (In Russian)
2. *GOST R 55050—2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnyy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy* [GOST R 55050—2012. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. (In Russian)
3. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Kruchek V. A. et al. Intellektual'naya sistema obnaruzheniya boksovaniya kolesnykh par v tyagovom privode postoyannogo toka [Intelligent system for detecting wheel pair skidding in a DC traction drive]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. 2019, Iss. 10, pp. 17–23. (In Russian)
4. Lisunov V. N., Esin N. V. *Elektronnaya sistema zashchity ot boksovaniya i yuza elektrovoza s pлавным zonnofazovym regulirovaniem napryazheniya* [Electronic anti-skidding and anti-slip protection system for electric locomotives with smooth zone-phase voltage regulation]. Patent RF, no. 40278, 2004. (In Russian)
5. Kolpakhch'yan P. G., Andreev V. E. Sovershenstvovanie sistemy zashchity ot yuza passazhirskogo elektrovoza [Improving the anti-skidding protection system for passenger electric locomotives]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 2, pp. 100–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-100-113. (In Russian)
6. Kharisov I. R., Limonov D. E., Korobitsyn K. R. *Sposob zashchity ot boksovaniya kolesnykh par elektrovoza*

podvizhnogo sostava s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Method for preventing skidding of wheelsets of electric rolling stock with asynchronous traction motors]. Patent RF, no. 2811618, 2024. (In Russian)

7. Litovchenko A. G., Litovchenko V. V. Protivoboksovochnaya zashchita tyagovogo podvizhnogo sostava [Anti-skid protection of traction rolling stock]. *Eksploatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotsessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava: trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Krasnoyarsk, 24–25 marta 2020 goda. Pod redaktsiyey I. K. Lakin* [Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Krasnoyarsk, March 24–25, 2020. Edited by I. K. Lakin]. Krasnoyarsk: Aktsionernoe obshchestvo “Dorozhnyy tsentr vnedreniya Krasnoyarskoy zheleznoy dorogi” Publ., 2020, pp. 208–215. (In Russian)

8. Kosmodamianskiy A. S., Batashov S. I., Nikolaev E. V. Razrabotka ustroystv predotvrashcheniya boksovaniya lokomotiva na osnove ob’ektnogo modelirovaniya tekhnicheskikh resheniy [Development of devices to prevent locomotive skidding based on object modeling of technical solutions]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii* [Automation and modeling in design and management]. 2022, Iss. 4(18), pp. 79–86. DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-79-86. (In Russian)

9. Vorob’ev V. I., Zlobin S. N., Izmerov O. V. et al. Analiz sposobov obnaruzheniya boksovaniya lokomotiva [Analysis of methods for detecting locomotive skidding]. *Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. 2022, Iss. 6(356), pp. 14–22. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-356-6-14-22. (In Russian)

10. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. et al. *Sposob obnaruzheniya boksovaniya i yuza koles*

transportnogo sredstva s elektricheskoy peredachey [Method for detecting wheel spin and skidding of a vehicle with an electric transmission]. Patent RF, no. 2702549, 2019. (In Russian)

11. Kruglov S. P., Kovyrshin S. V., Ivanov P. Yu. et al. Adaptivnaya podsypka peska na lokomotive [Adaptive sand adding on a locomotive]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. Systems analysis. Modeling]. 2021, Iss. 2(70), pp. 104–112. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112. (In Russian)

12. Kruglov S. P., Isupov S. A. *Sposob adaptivnogo upravleniya avtomaticheskoy podachey peska pod kolesa lokomotiva* [Method for adaptive control of automatic sand supply under locomotive wheels]. Patent RF, no. 2780751, 2022. (In Russian)

13. Konovalov P. Yu. Sovershenstvovanie pnevmaticheskoy sistemy peskopodachi elektrovozov vnedreniem drosseliruyushchikh ustroystv s servoprivodom [Improvement of the pneumatic sand delivery system of electric locomotives by introducing throttling devices with a servo drive]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2020, Iss. 1(77), pp. 25–33. (In Russian)

Received: December 30, 2024

Accepted: January 31, 2025

Author’s information:

Anatoly N. SAVOSKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; elmechtrans@mail.ru

Anton A. CHUCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; chuchin_anton@mail.ru

Alexey N. KALYAKULIN — PhD in Engineering; alexeiruz@yandex.ru

УДК 621.336.7

Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава

А. А. Воробьев, Н. В. Богданов

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

Для цитирования: Воробьев А. А., Богданов Н. В. Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 121–133. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-121-133

Аннотация

Цель: Исследование формирования возмущенного состояния воздушной среды в условиях аэродинамического взаимодействия подвижного состава с транспортной инфраструктурой. **Методы:** Представлены описание математических моделей и способы их реализации в трехмерной постановке в программном комплексе Solid Works Flow Simulation. Для решения поставленных задач использован метод Frozen Rotor, основанный на методе конечных элементов и объемов. **Результаты:** Приведены результаты исследований скоростей движения воздушных масс вблизи порталной зоны тоннеля, полученные с помощью разработанных математических моделей для случаев входа подвижного состава в тоннель и выхода из него. Выполнена валидация результатов натурных исследований и данных, полученных с помощью компьютерного моделирования. **Практическая значимость:** Проведены натурные исследования по перемещению воздушных масс при движении поезда в тоннеле. Исследованы процессы аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями тоннелей с использованием методов численного моделирования. Выявлена сложная структура образования возмущенных воздушных масс в зазоре между корпусом поезда и обделкой тоннеля, которая приводит к повышенному сопротивлению движения поезда в тоннеле, что влечет за собой снижение энергоэффективности.

Ключевые слова: Аэроупругое взаимодействие, аэродинамические факторы, высокоскоростной подвижной состав, эксперимент, «поршневой эффект», скорость воздушных масс, структура возмущенной воздушной среды, тоннельные сооружения.

Введение

Создание транспортных коммуникаций значительной протяженности, оптимизированных по критерию эффективности энергопотребления, в настоящее время является важнейшей задачей развития железнодорожного транспорта [1–3]. Основным ограничивающим фактором организации высокоскоростных магистралей является необходимость преодоления контурных пре-

пятствий местности, который решается устройством тоннельных сооружений, позволяющих значительно сокращать протяженность трасс, обеспечивать безопасность и бесперебойность движения транспорта в любых климатических условиях с обеспечением необходимого скоростного режима. Особенно это актуально для крупных городских агломераций с перегруженной логистикой наземного транспорта.

Аэродинамическое взаимодействие подвижного состава с воздушной средой в условиях движения в тоннельных сооружениях

Задача исследования аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с транспортной инфраструктурой особенно актуальна для движения транспорта по протяженным подземным сооружениям — тоннелям [4], ограниченность свободного пространства ставит вязкое сопротивление воздушной в лидирующие позиции определяющих факторов энергоэффективности и безопасности.

Кроме того, возмущенные воздушные массы могут оказывать негативное воздействие на пассажиров, находящихся как в салоне транспортного средства, так и вне его, в непосредственной близости от движущегося поезда. При высокоскоростном режиме движения поезда в ограниченном пространстве тоннеля могут возникать значительные перепады давления, величина которых может превышать допустимые пределы (перепад давления в тоннеле не должен превышать 10 кПа) [5–7], ухудшающие самочувствие пассажиров и поездной бригады.

Особое внимание при прохождении поездом тоннеля стоит уделить возникновению «поршневого эффекта»: вытеснение воздушных масс корпусом подвижного состава при его поступательном движении. Возникновение «поршневого эффекта» становится причиной возникновения значительного сопротивления движению и ведет к росту энергозатрат. Этот процесс описывается квадратичной зависимостью:

$$E = \frac{\rho v^2}{2},$$

где E — кинетическая энергия;

ρ — плотность среды;

v — скорость движения подвижного состава.

Также при выполнении расчетов сил сопротивления движению следует учитывать разрежение воздуха, образующееся за последним вагоном подвижного состава. Возникающие при этом силы также направлены против движения поезда и приводят к повышенному расходу энергии.

Таким образом, рассмотренные выше негативные явления значительно снижают эффективность эксплуатации высокоскоростного подвижного состава в тоннельных сооружениях.

Наблюдения показывают, что наибольшее сопротивление движению поезда возникает на порталном участке при входе поезда в тоннель и на выходе из него (соответственно, на конфузорном и диффузорном участках). В соответствии с законом Бернулли снижение сечения вызывает резкое увеличение скорости движения потока воздуха. Возрастание скорости, в свою очередь, ведет к увеличению силового воздействия воздушных масс на подвижной состав и элементы железнодорожной инфраструктуры. Соответственно, при выходе из тоннеля наблюдается резкий выброс уплотненных воздушных масс. Подобный эффект наблюдается и в метрополитенах [8, 9].

Физика данного процесса определяется закономерностью формирования уплотненных воздушных масс при движении высокоскоростного подвижного состава на конфузор-диффузорных участках тоннельных сооружений.

Возникновение сильного сопротивления движению поезда характерно для тоннелей перевального типа протяженностью 10–15 км. Однако подобные тоннели возведены в горной местности на юге и в дальневосточной части России, что представляет определенные трудности для проведения практических исследований.

Адекватная картины процесса формирования структуры воздушной среды в момент прохождения поезда порталного сооружения может быть получена путем синхронного замера (опроса)

датчиков, расположенных на поверхности обтекателя транспортного средства, и обделки тоннеля. Однако проведение натурного эксперимента оказывается крайне энергоемким и затратным мероприятием, сопряженным с рядом ограничений безопасности на транспорте.

Наиболее целесообразным в данной ситуации представляется применение методов численного моделирования. В частности, предлагается использовать средства вычислительной гидродинамики, разработанные CFD-модели, в среде *FlowSimulation* программного комплекса *SolidWorks*.

Поскольку формирование возмущенной среды является многофакторным процессом, в котором учитывается многоаспектная физика взаимодействия сложных вихревых образований, индуцированных подвижным составом, в целях упрощения разработанная модель использует в качестве граничных условий данные, полученные в ходе натурного эксперимента, проведенного в метрополитене [10].

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования по перемещению воздушных масс были проведены на станции «Обводный канал» ГУП «Петербургский метрополитен». Станция «Обводный канал» входит в состав Фрунзенско-Приморской линии. По своей конструкции относится к станциям пилонного типа глубокого заложения (располагается на глубине 61 м под землей). Длина платформы составляет 165 м.

В обеспечении естественной вентиляции подземных объектов метрополитена особую роль играет «поршневой эффект», вызываемый проходящими в тоннеле поездами. «Поршневой эффект» в тоннеле метрополитена, в отличие от перевальных тоннелей (служащих для преодоления значительных высотных препятствий), помогает создавать достаточную для проветривания

тоннеля скорость движения воздушных масс. Поэтому важно этот процесс контролировать, чтобы скорость движения воздушных масс не выходила за пределы установленных нормативных значений и не создавала угрозу безопасности пассажиров.

В качестве измерительного оборудования использовался электронный анемометр, который располагался в непосредственной близости от пути следования поезда.

Измерения проводились в характерных точках станции согласно схеме, представленной на рис. 1. Высота расположения воздухозаборника оборудования оставляла 1,5–1,7 м над уровнем платформы. Удаление точки замера от порталной части тоннеля варьировалось в диапазоне от 4 до 5 м.

Контрольные точки измерений располагались на участках порталного сооружения тоннеля:

1. Точка «1» — прибытие на станцию поезда, следующего в центр города.
2. Точка «2» — отправление поезда, следующего в центр города.
3. Точка «3» — прибытие на станцию поезда, следующего из центра города.
4. Точка «4» — отправление поезда, следующего из центра города.

Измерения проводились при нормальных климатических условиях: температура — 22–24 °С; относительная влажность воздуха — 60 %; атмосферное давление — 752 мм рт. ст.

В каждой точке было выполнено по 5 измерений. Показания скорости воздушного потока в зависимости от приближения поезда представлены на рис. 2 и 3. Скорость движения подвижного состава в момент выхода из тоннеля составляла 60–70 км/ч.

При приближении поезда к станции наблюдается плавное увеличение скорости движения воздушных масс. Скорость достигает своих пиковых значений, когда поезд пересекает границу пор-

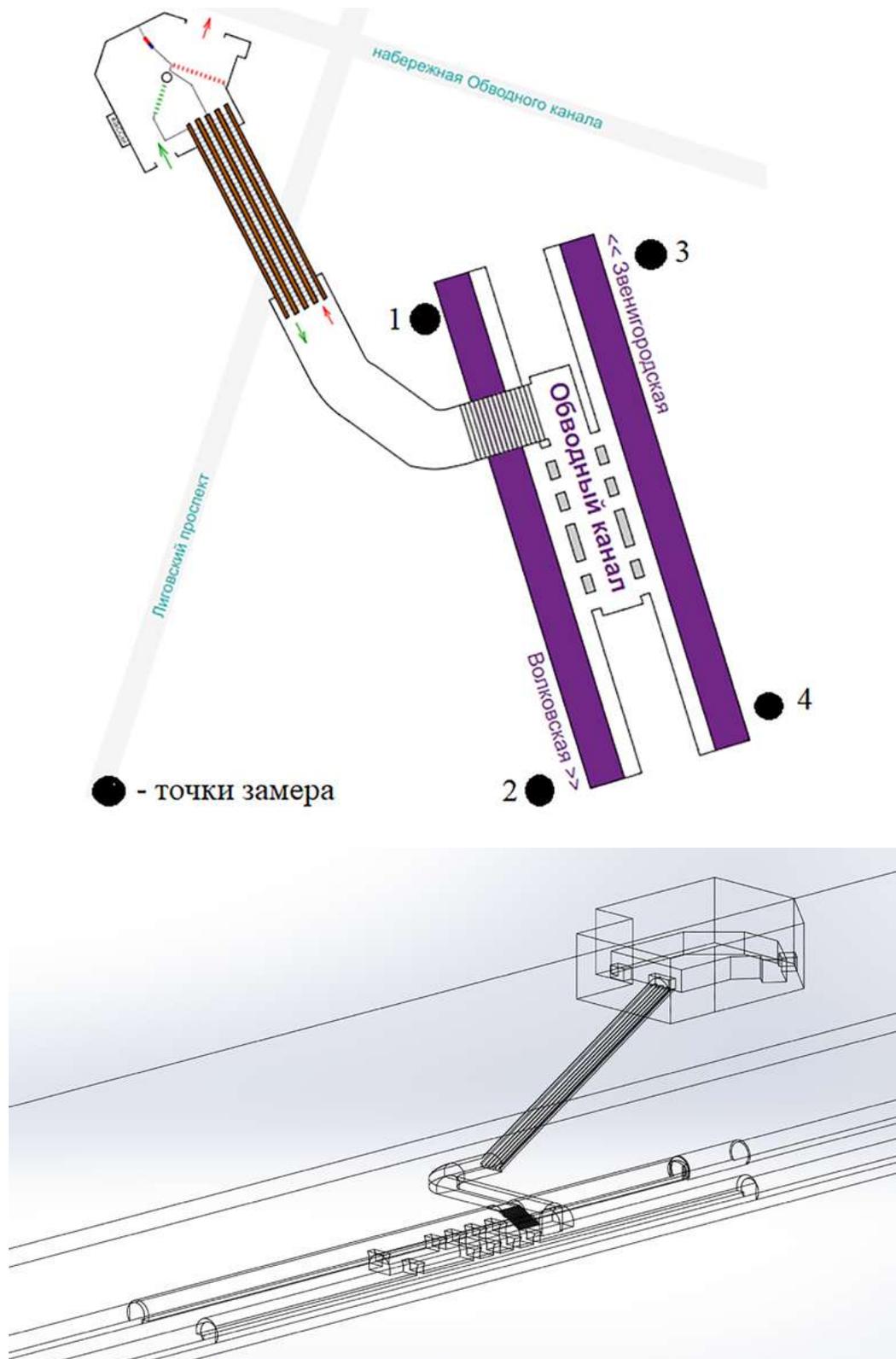


Рис. 1. План и пространственная модель станции «Обводный канал» метрополитена г. Санкт-Петербурга

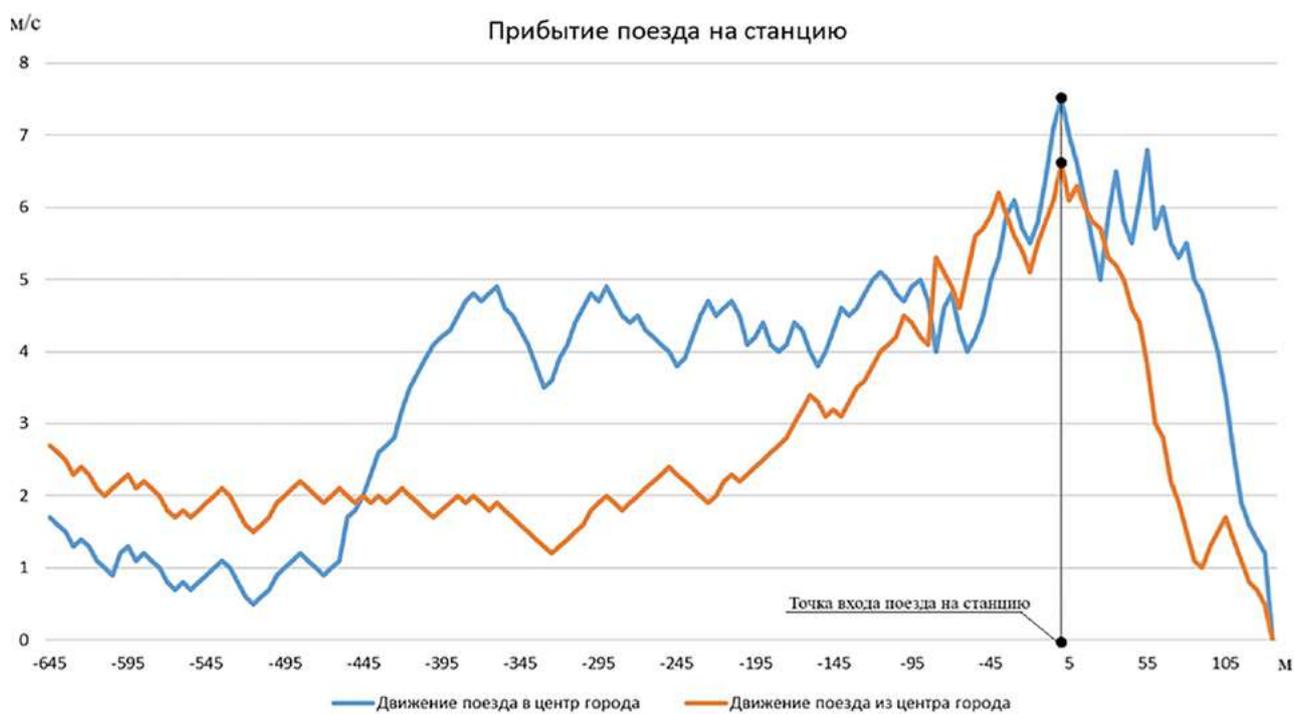


Рис. 2. График изменения скорости движения воздушного потока в точках измерения 1 и 4 в момент прибытия поезда на станцию

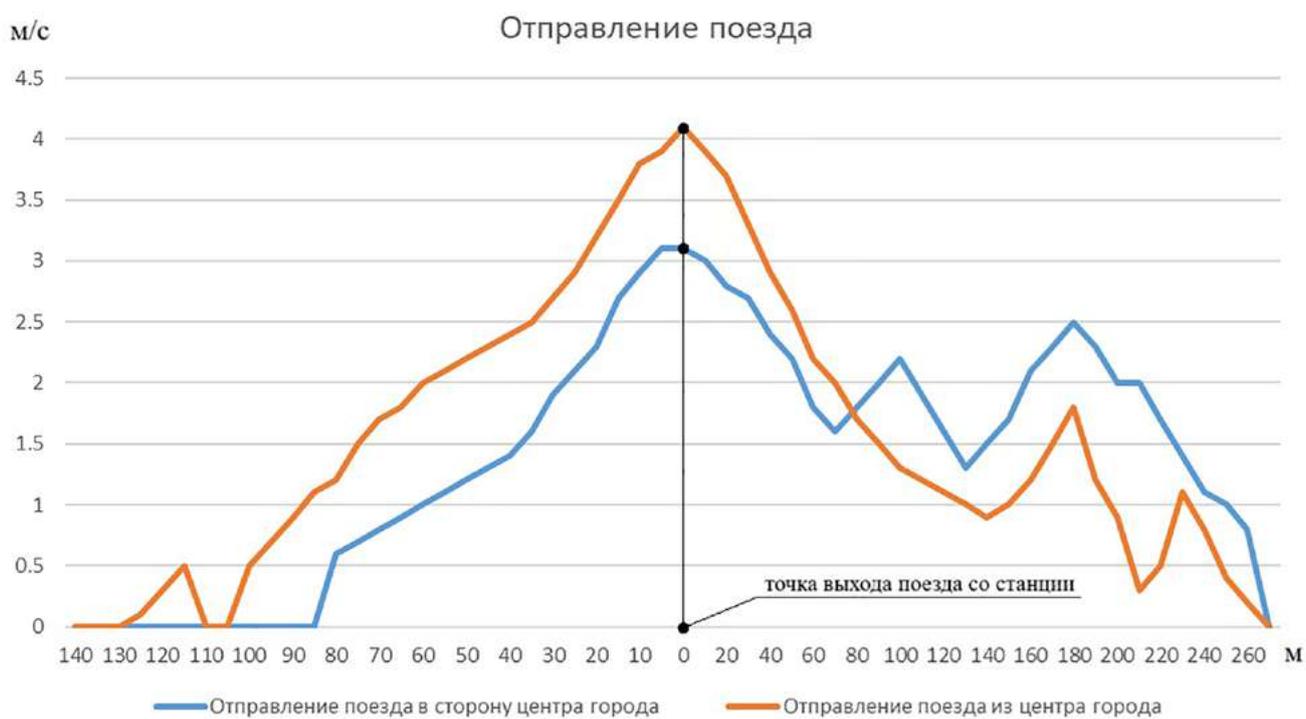


Рис. 3. Скорости движения воздушного потока в момент отправления поезда

тального сооружения, после чего интенсивность движения воздушных масс резко снижается.

При отправлении поезда со станции наблюдается обратное явление: значительная часть воздушных масс увлекается поездом в движение, однако весь объем увлеченных воздушных масс не успевает пройти узкий диффузор, образованный порталным сооружением и корпусом движущегося поезда. Оставшаяся часть вязкой среды, обладающая значительной кинетической энергией, скапливается перед порталной частью тоннеля, совершая характерное вихревое движение. Данное явление получило название «противоток воздуха» и оказывает дополнительное сопротивление движению поезда в момент отправления состава со станции. По завершении процесса втягивания состава в тоннель оставшиеся объемы воздушных масс всасываются в объем тоннеля.

Согласно шкале Бофорта, интенсивность движения воздушных масс можно оценить как умеренный ветер 4–5 баллов, со средней скоростью 5–10 м/с.

В соответствии с требованиями СанПиН 32-02—2003 «Метрополитены» [11] устанавлива-

ются максимально допустимые значения скорости перемещения воздуха на станционных участках. При температуре воздуха от 18 °С до 28 °С средняя скорость движения воздуха должна варьироваться в диапазоне от 0,5 до 2,0 м/с. В момент прибытия и отправления подвижного состава скорость может повышаться не более чем в два раза.

В ходе проведенного эксперимента было установлено, что на станции «Обводный канал» метрополитена г. Санкт-Петербурга скорость движения воздушных масс превышает значение 7,2 м/с, что в 1,8 раза больше нормы, установленной требованиями СанПиН 32-02—2003.

Разработка имитационной модели поезда и станции метрополитена «Обводный канал»

Современным способом оценки аэродинамических эффектов, которые возникают при взаимодействии железнодорожного подвижного состава с транспортной инфраструктурой, является численное моделирование на основе методов конечных элементов и объемов [12, 13].

Порядок решения задачи включает три основные части:

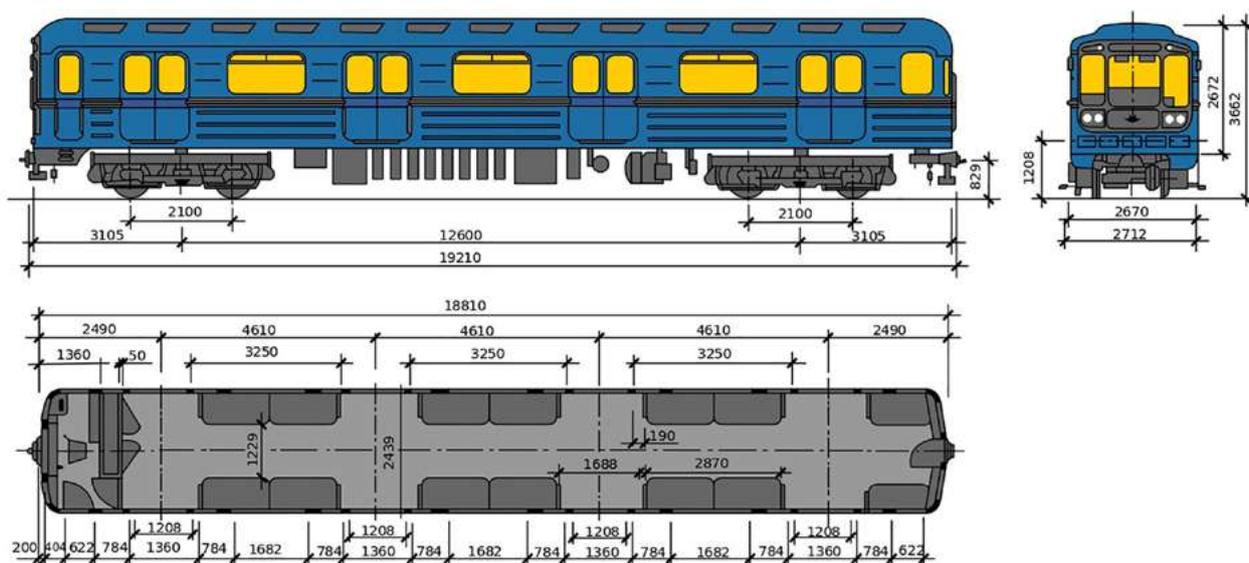


Рис. 4. Электропоезд 81-717/714

1. Подготовка геометрической модели с последующим построением структуры конечных элементов.

2. Выбор начальных и граничных условий, модели турбулентности и, собственно, сам расчет.

3. Анализ результатов, построение эпюр (картин распределения) и графиков давления и скоростей воздушных масс.

В качестве программного комплекса, который способен выполнить поставленные задачи по анализу аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями при стационарной постановке задачи, был выбран программный комплекс *SolidWorks* [14].

В качестве подвижного состава была выбрана распространенная модель электропоезда 81-717/714 (рис. 4)

Принят состав семивагонной схемы, которая на данный момент используется на Фрунзенско-Приморской линии Санкт-Петербургского метрополитена. С целью повышения эффективности компьютерных вычислений модель была редуцирована: был исключен ряд деталей, не влияющих на результат моделирования.

Модель станции «Обводный канал» разрабатывалась согласно представленной выше схеме (рис. 2) с соблюдением основных геометрических параметров. Из расчетов были также исключены элементы железнодорожного пути и оборудование тоннельных помещений.

Анализ аэроупругого взаимодействия на основе численного моделирования с применением метода *Frozen Rotor*

Широкое применение при исследовании функционирования гидравлических систем, в основе которых имеются подвижные и неподвижные элементы, получил метод под названием *Frozen Rotor*. Суть метода заключается в разделении конструкции на две основные составляющие: статор (неподвижная часть) и ротор (подвижная часть).

Данный метод можно адаптировать для решения аэродинамических задач, в частности для расчета движения воздушных масс в зазоре между поездом и обделкой тоннеля. В этом случае подвижной состав является ротором (подвижной частью), а тоннель статором (неподвижной частью). Но так как данный метод предназначен для исследования вращательной системы, принимается допущение о том, что поезд движется по окружности очень большого диаметра, а соответствующие силы и импульсы прикладываются к воздушному потоку. Метод предполагает исследование движения текучей среды в конкретный отрезок времени, соответственно, в этом случае поезд будет двигаться не по окружности, а по прямой (хорде), что будет соответствовать движению в реальности. При этом происходит фиксация поезда в конкретном положении, но поток воздуха продолжает перемещение. Это позволяет исследовать структуру текучей среды для выбранного положения подвижного состава (ротора) относительно тоннельного сооружения (статора) [12–16].

Преимущество данного метода заключается в высокой эффективности и возможности исследовать аэродинамические процессы в различных точках движения поезда.

При расчете применялась распространенная k - ϵ модель турбулентности с построением сеточной структуры, размеры ячеек которой составили 0,25–0,5 м. В качестве граничных условий применены следующие параметры среды: давление — 101 395 Па, температура — 22 °С, начальная скорость воздушной среды — 0 м/с, кинематическая вязкость ν — $1,5 \cdot 10^{-5}$ (м²/с), динамическая вязкость η — 18,1 (мПа·с).

Моделирование производилось в программном комплексе *Solid Works* с использованием модуля *FlowSimulation*. Движение железнодорожного состава выполнено с применением функции *motionrealwall* (движущаяся реальная стена).

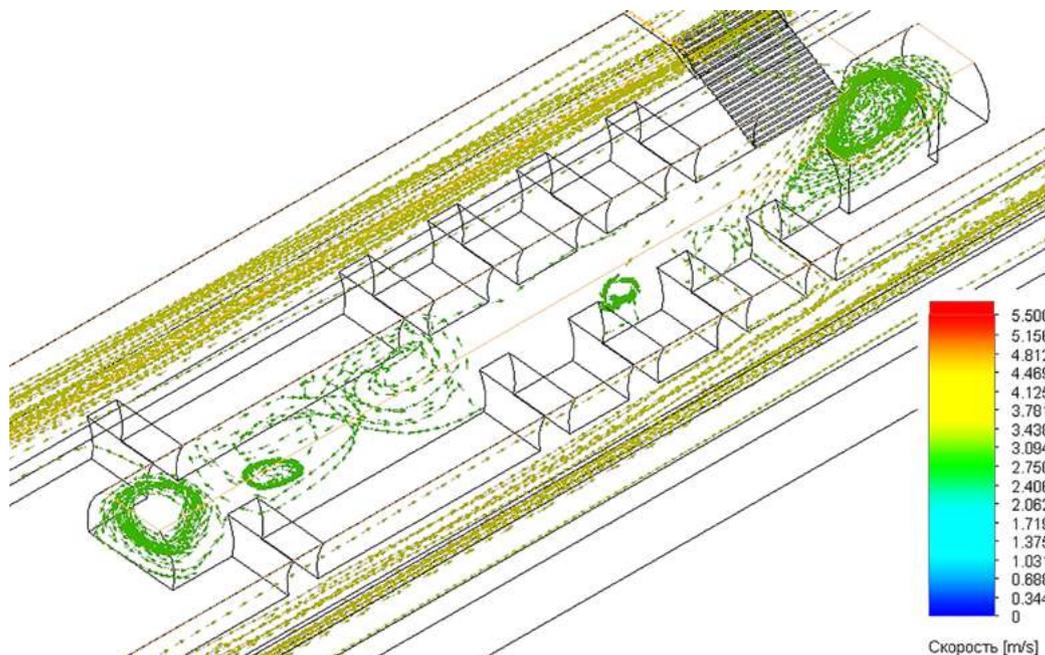


Рис. 5. Эпюра траекторий движения воздушных масс в вестибюле станции

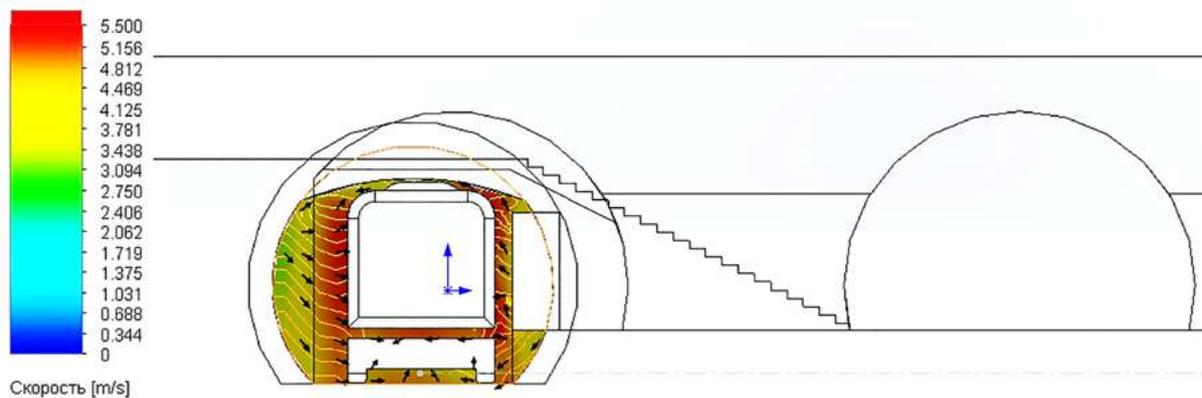


Рис. 6. Эпюра распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда) в поперечной плоскости

В качестве примера рассматривался процесс движения состава в момент прибытия на станцию «Обводный канал». Результаты расчетов, полученные данным методом, представлены на рис. 5–9.

При входе поезда на станцию наблюдается увеличение скорости движения воздушных масс в вестибюле станции. Воздушные массы приобретают вихреобразную структуру высокой интенсивности. Особенно это проявляется в пилонной части станции и в зоне наклонного хода (рис. 6).

В зоне порталной части тоннеля в момент, когда головная часть первого вагона входит на станцию, наблюдается интенсивный поток воздушных масс до 5 м/с (рис. 7).

Наиболее сложным участком является порталная часть тоннеля. В этой области образуются интенсивные вихревые образования и высокая скорость движения воздушных масс. Это связано с резким изменением поперечного сечения тоннельного сооружения.

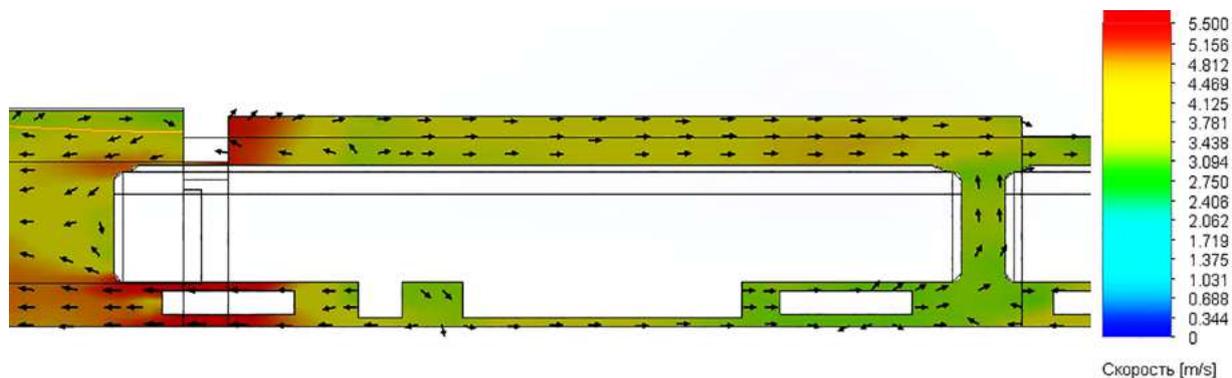


Рис. 7. Эпюра распределения скоростей текучей среды (прибытие поезда) в продольной плоскости

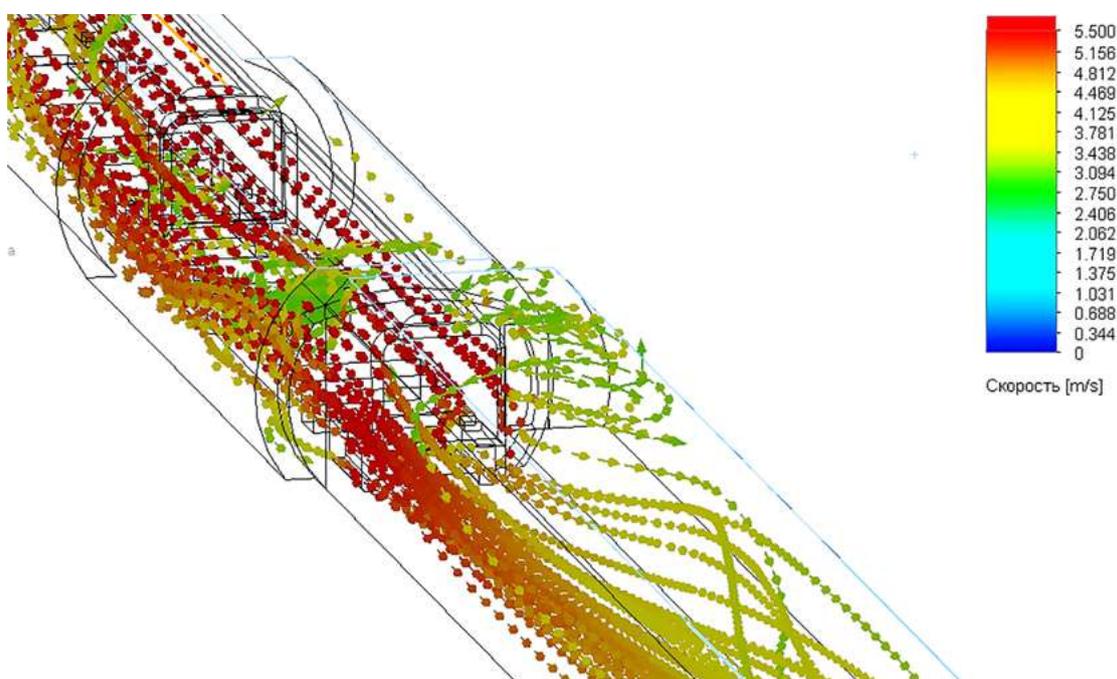


Рис. 8. Эпюра распределения вихревых образований в момент входа состава на станцию

При этом происходит изменение структуры воздушного потока в области портала, воздушные массы уплотняются, наблюдается формирование вихревой структуры. Помимо прочего, увеличивается скорость течения воздуха в подвагонном пространстве (рис. 8).

На эпюрах отчетливо видна высокая скорость движения воздушных масс (до 5,5 м/с), а также неоднородность воздушных масс. Поезд, прибывающий на станцию, с большой силой выталкивает из тоннеля порцию воздуха, которая посте-

пенно набирает скорость и в момент прибытия волнами врывается на платформу, где располагаются пассажиры. Возникающие вихри — очень плотные и препятствуют движению другого воздуха. Взаимодействие вихрей воздуха с движущимся подвижным составом оказывает негативное влияние на тягу. Вихри заполняют все свободное пространство вокруг подвижного состава (рис. 9).

Таким образом, «поршневой эффект» влияет на структуру распределения воздушных потоков

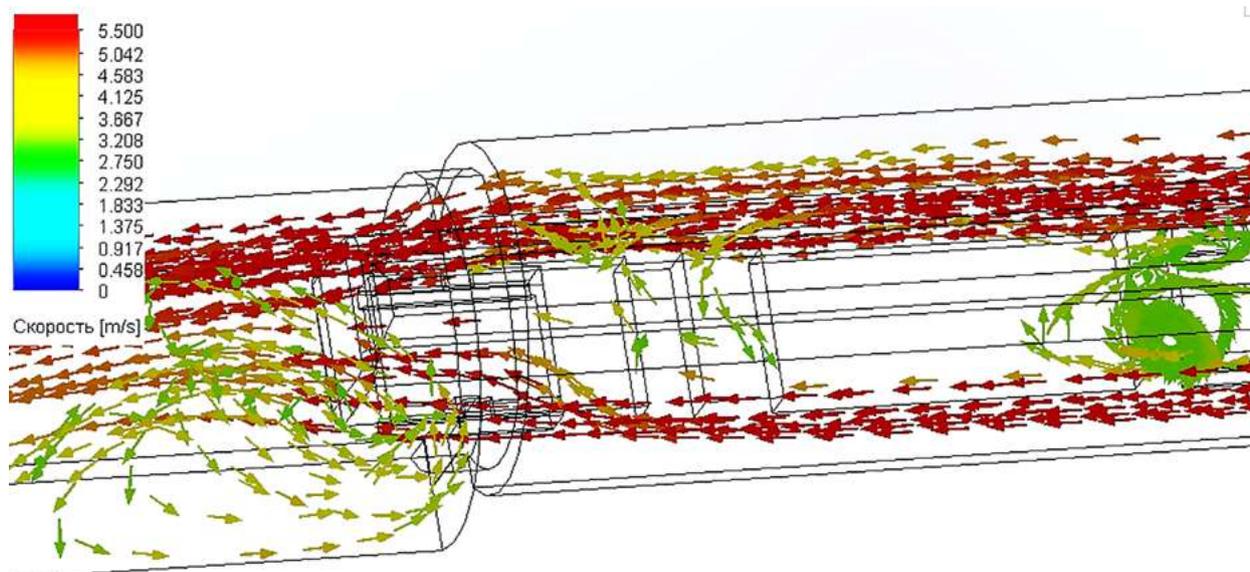


Рис. 9. Эпюра распределения вихревых образований в момент входа состава на станцию

в тоннельных сооружениях, изменяя скорость текучей среды. Образование уплотненных воздушных масс перед составом оказывает дополнительное сопротивление движению поезда, особенно актуально это становится в случае движения высокоскоростного подвижного состава. При этом принудительное перемещение воздуха оказывает положительный эффект на продувку тоннельных сооружений в метрополитене, что улучшает показатели воздухообмена [17].

Заключение

Метод *Frozen Rotor* является современным и удобным методом расчета движения воздушных масс. При сохранении относительной точности сокращается время вычислений. Данный метод отлично подходит для исследования стационарных процессов с простой структурой текучей среды. При этом данный метод не дает возможности рассмотреть движение воздушных масс в динамике. Полученные результаты являются фрагментом сложного процесса, в то время как возникновение «поршневого эффекта» в тоннеле претерпевает изменения на пути движения поезда от станции к станции.

Значения скорости воздушных масс, полученные с использованием методов численного моделирования и метода *Frozen Rotor*, отличаются от тех, что были получены при проведении натурального эксперимента. Это связано с тем, что метод *Frozen Rotor* позволяет оценить воздушные потоки только в конкретный момент времени. По этой причине в настоящее время нет возможности проанализировать «поршневой» эффект в полной мере и отследить его развитие. Кроме того, данный метод не позволяет обнаружить эффект противотока воздуха, который возникает при покидании поездом станции. Последний эффект также представляет интерес для исследования, так как может влиять на энергоэффективность и безопасность пассажиров.

«Поршневой эффект» и эффект противотока воздуха подробнее можно исследовать с помощью более продвинутого и более сложного метода — «деформированные сетки», основанного на создании сеточного пространства, которое может адаптироваться и менять свое положение в зависимости от изменения геометрии области. Главная особенность и преимущество данного метода, в отличие от метода *Frozen Rotor*, заключается в том, что моделирование происходит не

в стационарном режиме, а в динамическом, что дает возможность учесть турбулентные эффекты (вихри, обратные потоки), которые возникают при движении поезда в тоннеле и на станции.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Список источников

1. Стратегия развития до 2030 года. — URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/about-company/development-strategy> (дата обращения: 01.11.2024).
2. Ледаев А. П. Особенности проектирования тоннелей на высокоскоростных магистралях / А. П. Ледаев, В. Н. Кавказский, Р. О. Креер // Транспорт Урала. — 2015. — № 4(47). — С. 3–9. — DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9.
3. Воробьев А. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев и др. // Известия ПГУПС. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 590–599.
4. Кияница Л. А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 11. — С. 400–407.
5. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные.
6. 779-11R. Determination of railway tunnel cross sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
7. Нормативные документы. Специальные технические условия. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий.
8. Каримов Д. Д. Особенности формирования структуры воздушных масс в тоннеле при движении поезда / Д. Д. Каримов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Транспорт БРИКС. — 2023. — Т. 2. — Вып. 2. — Ст. 6. — DOI: 10.46684/2023.2.6.
9. Лугин И. В. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях / И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 155–160.
10. Богданов Н. В. Обзор методов CFD-моделирования аэродинамических процессов при движении подвижного состава по протяженным подземным сооружениям / Н. В. Богданов, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин и др. // Системы автоматизированного проектирования на транспорте. — 2023. — С. 28–34. — DOI: 56575829.
11. СанПиН 32-02—2003. Метрополитены.
12. Богданов Н. В. Использование численного моделирования при анализе аэроупругого взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями / Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2024. — № 1. — С. 65–73. — DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73.
13. Воробьев А. А. Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа / А. А. Воробьев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников и др. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2024. — № 1(110). — С. 62–68.
14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 64 с.
15. Ватаев А. С. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей / А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 104–123. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.
16. Алферова Е. Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена / Е. Л. Алферова, И. В. Лугин, Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 6. С. 5–14.
17. Красюк А. М. Исследование воздухораспределения в протяженных транспортных тоннелях БАМ / А. М. Красюк, И. В. Лугин, Е. Л. Алферова // Интерэкспо

ГЕО-Сибирь. — 2019. — Т. 2. — № 4. — С. 114–121. —
DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121.

Дата поступления: 08.01.2025

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,
проф.; nttk@pgups.ru

БОГДАНОВ Никита Вадимович — магистр, аспирант;
nttk@pgups.ru

Modelling the “Piston Effect” Caused by a Train Running in the Tunnel

A. A. Vorobev, N. V. Bogdanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Vorobev A. A., Bogdanov N.V. Modelling the “Piston Effect” Caused by a Train Running in the Tunnel // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 121–133. (In Russian)
DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-121-133

Summary

Purpose: To investigate the formation of air turbulence and aerodynamic forces influencing high-speed trains passing through a tunnel. **Methods:** Implementation of three-dimensional numerical models in the software complex “Solid Works Flow Simulation” is presented. To solve the tasks, the Frozen Rotor method was used based on the finite element and volume method. **Results:** The study results on the air mass velocities near the tunnel portal zone using the developed numerical models for the train entering into and exiting the tunnel are presented. The results of field studies and data obtained using computer modelling have been validated. **Practical significance:** Field studies were carried out on the air mass movement during the train run through the tunnel. The aeroelastic interaction of rolling stock with the tunnel portal structures using numerical models have been investigated. The complexity of turbulent air mass formation in the gap between the train body and the tunnel lining resulting in increased air resistance to train movement in the tunnel and reduced energy efficiency have been shown.

Keywords: Aeroelastic interaction, aerodynamic factors, high-speed rolling stock, experiment, “piston effect”, air mass velocity, turbulent air structure, tunnel structures.

References

1. *Strategiya razvitiya do 2030 goda* [Development strategy until 2030]. Available at: <https://sr2021.rzd.ru/ru/about-company/development-strategy> (accessed: November 01, 2024). (In Russian)

2. Ledyayev A. P., Kavkazsky V. N., Kreer R. O. Osobennosti proektirovaniya tonneley na vysokoskorostnykh magistralyakh [Features of tunnel design on high-speed highways]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2015, Iss. 4(47), pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2015-4-3-9. (In Russian)

3. Vorobyov A. A., Vatulin Ya. S., Vataev A. S. et al. K voprosu snizheniya negativnogo effekta vozdeystviya aerouprugogo vzaimodeystviya vysokoskorostnogo podvizh-

nogo sostava s elementami tonnel'nykh sooruzheniy [On the issue of reducing the negative effect of the aeroelastic interaction of high-speed rolling stock with elements of tunnel structures]. *Izvestia PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 590–599. (In Russian)

4. Kiyantsa L. A. Issledovanie dinamiki davleniy na poverkhnosti vagonov poezda v dvukhputnom tonnele metro politena [Study of pressure dynamics on the surface of train cars in a double-track metro tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, Iss. 11, pp. 400–407. (In Russian)

5. SP 122.13330.2012. *Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye* [SP 122.13330.2012. Railway and road tunnels]. (In Russian)
6. 779-11R. Determination of railway tunnel cross sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
7. *Normativnye dokumenty. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya. Svod pravil. Sooruzheniya iskusstvennye vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy* [Regulatory documents. Project Specific Technical Specifications. Code of practice. Artificial high-speed railway lines]. (In Russian)
8. Karimov D. D., Vatulin Y. S., Vorobyov A. A. et al. Osobennosti formirovaniya struktury vozdukhnykh mass v tonnele pri dvizhenii poezda [Peculiarities of the formation of the structure of air masses in the tunnel during train movement]. *Transport BRIKS* [BRICS transport]. 2023, vol. 2, Iss. 2, Art. 6. DOI: 10.46684/2023.2.6. (In Russian)
9. Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie aerodinamicheskikh protsessov pri dvizhenii poezda v protyazhennykh zheleznodorozhnykh tonnelyakh [Study of aerodynamic processes during train movement in long railway tunnels]. *Interekspo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia]. 2018, vol. 5, pp. 155–160. (In Russian)
10. Bogdanov N. V., Vataev A. S., Vatulin Y. S. et al. Obzor metodov CFD-modelirovaniya aerodinamicheskikh protsessov pri dvizhenii podvizhnogo sostava po protyazhennym podzemnym sooruzheniyam [Review of methods for CFD-modeling of aerodynamic processes when rolling stock moves through extended underground structures]. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte* [Computer-aided design systems for transport]. 2023, pp. 28–34. DOI: 56575829. (In Russian)
11. *SanPiN 32-02—2003. Metropoliteny* [SanPiN 32-02—2003. Subways]. (In Russian)
12. Bogdanov N. V., Vatulin Y. S., Vorobyov A. A. et al. Ispol'zovanie chislennogo modelirovaniya pri analize aerouprugogo vzaimodeystviya podvizhnogo sostava s tonnel'nymi sooruzheniyami [The use of numerical modeling in the analysis of aeroelastic interaction of rolling stock with tunnel structures]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2024, Iss. 1, pp. 65–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73. (In Russian)
13. Vorobyov A. A., Karimov D. D., Sotnikov K. A. et al. Upravlenie aerodinamicheskimi vzaimodeystviyami vysokoskorostnogo poezda s elementami iskusstvennykh sooruzheniy tonnel'nogo tipa [Control of aerodynamic interaction of a high-speed train with elements of tunnel-type artificial structures]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]. 2024, Iss. 1(110), pp. 62–68. (In Russian)
14. Alyamovsky A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (In Russian)
15. Vataev A. S., Vatulin Ya. S., Vorobyov A. A. et al. Tsifrovoye modelirovaniye aerouprugogo vzaimodeystviya podvizhnogo sostava s portal'nymi sooruzheniyami pereval'nykh tonneley [Digital modeling of aeroelastic interaction of rolling stock with portal structures of transit tunnels]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2022, Iss. 1, pp. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123. (In Russian)
16. Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyanitsa L. A. Modelirovaniye vozmushcheniy vozdushnogo potoka pri dvizhenii poezdov v dvukhputnom tonnele metropolitena [Modeling of air flow disturbances during train movement in a double-track metro tunnel]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mountain Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2016, Iss. 6, pp. 5–14. (In Russian)
17. Krasnyuk A. M., Lugin I. V., Alferova E. L. Issledovanie vozdukhoraspredeleniya v protyazhennykh transportnykh tonnelyakh BAM [Study of air distribution in long transport tunnels BAM]. *Interekspo GEO-Sibir'* [Interexpo GEO-Siberia]. 2019, vol. 2, Iss. 4, pp. 114–121. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-2-4-114-121. (In Russian)

Received: January 08, 2025

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Alexander A. VOROBIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nttk@pgups.ru

Nikita V. BOGDANOV — Master's Degree, Postgraduate Student; nttk@pgups.ru

УДК 551.343.74

Анализ мировых тенденций развития интермодальных пересадочных узлов на базе международных аэропортов

В. Н. Кавказский

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

Для цитирования: *Кавказский В. Н.* Анализ мировых тенденций развития интермодальных пересадочных узлов на базе международных аэропортов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 134–147. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-134-147

Аннотация

Цель: Анализ аспектов взаимодействия воздушного и железнодорожного транспорта, определение особенностей проектирования интермодальных комплексов и перевозок, разработка концепции интермодального пересадочного узла на базе аэропорта. **Методы:** Экспериментально-теоретического уровня, основанные на анализе, сборе фактов и их проверке, систематизации, выявлении зависимостей и определении причинно-следственных связей. **Результаты:** Проведенный анализ позволил получить полную информацию для проектирования тоннельных сооружений в действующих аэропортах. Определены критерии эффективности взаимодействия воздушного и железнодорожного транспорта. Установлены особенности интеграции железнодорожного транспорта в инфраструктуру аэропорта.

Ключевые слова: Интермодальность, тоннель, подземный терминал, взаимодействие воздушного и железнодорожного транспорта, легкорельсовый транспорт, метро, аэроэкспресс, высокоскоростные линии.

В данной статье рассматривается мировой опыт проектирования и эксплуатации интермодальных пересадочных узлов между железнодорожным и авиационным транспортом.

Железнодорожный транспорт рассматривается как положительное интегрированное звено транспортных связей между удаленными аэропортами и городскими центрами, так и дублирующая система, отрицательно влияющая на воздушный транспорт при развитии линий конкурирующих направлений.

Эти взаимосвязи рассматриваются с точки зрения фактического опыта работы на рынках транспортных услуг Европы, Азии и Соединенных Штатов Америки, а также предпочтения в выборе типа железнодорожного транспорта в различных частях мира.

Аспекты взаимодействия воздушного и железнодорожного транспорта

Можно описать три вида взаимодействия воздушного и железнодорожного транспорта: конкуренция, взаимодополняемость, сотрудничество как частный случай взаимодополняемости.

Конкуренция между воздушным и железнодорожным транспортом в паре отправление — назначение обычно затрагивает разных операторов. Одним из примеров является сообщение между Парижем и Лондоном, где высокоскоростные поезда Eurostar конкурируют с воздушными перевозками нескольких авиакомпаний.

Конкуренция между двумя режимами на линии связи возникает, когда они взаимозаменяемы, таким образом удовлетворяя ту же самую транспортную потребность. Пассажир может

выбрать тот или иной способ добраться из точки А в точку Б, и можно определить факторы, определяющие рыночную долю воздушного и железнодорожного транспорта в таких ситуациях [1]:

- время в пути (время в пути на железнодорожном транспорте превышает время в пути по воздуху);
- время и стоимость доступа к терминалу;
- стоимость билетов и условия;
- пунктуальность и надежность;
- качество обслуживания на борту поезда/самолета и на терминалах;
- наличие недорогих альтернатив.

При продолжительности поездки до 3 часов преимущество авиаперевозок в скорости снижается из-за жесткости производственного процесса транспортировки. Путешествие на самолете требует большого количества операций, связанных с досмотром, особенно из соображений безопасности. При более коротких поездках доля времени, затраченного на дорогу до аэропорта, очень велика, включая, помимо прочих операций, поездку до аэропорта и 1–2 часа в аэропорту для регистрации и проверки безопасности. Кроме того, до 20 % рейсов отправляются с задержкой более 15 минут, воздушный транспорт находится в невыгодном положении по сравнению с железнодорожным транспортом с точки зрения времени/цены, поскольку железнодорожные перевозки регистрируют только 4–8 % задержек в течение 14 минут, и в большинстве случаев железнодорожные вокзалы имеют лучшую доступность, чем аэропорты.

В Европе конкуренция между воздушным и железнодорожным транспортом возникает в коридорах/рынках с высокими объемами перевозок в пунктах отправления и назначения, таких как Мадрид — Севилья, Мадрид — Барселона, Лондон — Париж, Лондон — Брюссель, Франкфурт — Кельн, Париж — Марсель, Лондон — Манчестер и Лондон — Эдинбург, где в среднем

высокоскоростной поезд со временем в пути от 1 до 3 часов может занять 30–90 % рынка авиаперевозок.

Эти случаи конкуренции между воздушным и железнодорожным транспортом широко изучены и документированы. На примере Мадрида — Севильи можно наблюдать, что с открытием высокоскоростного железнодорожного сообщения между двумя городами доля авиарынка упала с 40 до 13 % и в последнее время состоит в основном из трансферных пассажиров [2].

Дополнительный момент в конкуренции между воздушным и железнодорожным транспортом, связанный с расположением железнодорожных станций в аэропортах. Большинство аэропортов расположены на небольшом удалении от города и не всегда имеют развитую разветвленную транспортную связь с районами. В этой связи железнодорожная станция в аэропорту будет способствовать развитию дополнительных скоростных железнодорожных маршрутов и работать независимо от воздушного сообщения.

Таким образом, введение железнодорожных станций в аэропортах может способствовать конкуренции между видами городского транспорта.

Взаимодополняемость режимов связи обычно предполагает участие разных операторов. Зачастую железнодорожный транспорт дополняет авиаперевозки, обеспечивая сообщение из аэропорта до конечного пункта путешествия. Одним из примеров является путешествие из Парижа в Мальме, состоящее из воздушного сообщения из Парижа в аэропорт Стокгольма, за которым следует железнодорожный маршрут до Мальме. В данном конкретном случае оператором авиаперевозок является Air France, а оператором железнодорожных перевозок — SJ. Для обеспечения взаимодополняемости необязательно, чтобы оба оператора координировали прибытие и отправление или интегрировали билеты, но должна быть возможность последовательно использовать их туристические

услуги для завершения поездки: два вида транспорта будут рассматриваться как дополняющие друг друга для пользователя, когда их последовательное использование либо необходимо, либо предпочтительнее использование одного вида транспорта для поездки между двумя городами.

Сотрудничество между видами транспорта на конкретном маршруте предполагает использование интегрированных продуктов и, как правило, разных операторов. Это особый случай взаимодополняемости, то есть железнодорожный транспорт дополняет авиаперевозки, заменяя или добавляя сообщение на короткие/средние расстояния, которое интегрировано с авиаперевозками в одном продукте. Одним из примеров является рейс Нью-Йорк — Штутгарт, продаваемый авиакомпанией Lufthansa: билет включает в себя обе линии (из Нью-Йорка во Франкфурт самолетом и из Франкфурта в Штутгарт по железной дороге), и предусмотрена единственная регистрация багажа при посадке.

Следует отметить, что в выводах, изложенных в исследовании ИТА, (Управление международной торговли), отмечено, что на высокоскоростных железнодорожных маршрутах протяженностью менее 600 км, при условии, что железнодорожный маршрут длиннее воздушного не более чем на 20 %, и средней скорости не менее 250 км/ч, интеграция авиакомпаний и железных дорог приносит пользу авиакомпаниям, пассажирам и окружающей среде.

Особенности интермодальных перевозок

Из определений сотрудничества и взаимодополняемости, приведенных в предыдущем разделе, следует, что они возникают при интермодальных поездках, когда промежуточный узел выступает в качестве платформы для переключения видов транспорта.

Определение интермодальности Европейской комиссии следующее.

Интермодальность — это характеристика транспортной системы, которая позволяет интегрированно использовать как минимум два различных вида транспорта в транспортной цепочке «от двери до двери».

Интермодальность — это качественный показатель уровня интеграции и взаимодополняемости между видами транспорта, который открывает возможности для более эффективного использования транспортной системы [3].

Существует две определяющие особенности интермодальных перевозок:

- 1) использование более чем одного вида транспорта для совершения поездки;
- 2) координация между этими видами транспорта при предоставлении туристических услуг.

В области воздушного сообщения различают интермодальные перевозки: те, при которых один вид транспорта обеспечивает исключительно наземный доступ к аэропорту, и интермодальные перевозки, при которых наземный участок соответствует значительной части поездки. Разработчики утверждают, что это различие важно, поскольку каждый тип интермодальности имеет разные последствия с точки зрения инвестиций, потребностей пассажиров, операторов и координации транспортной политики, таким образом принимая следующие категории.

Интермодальность типа 1 относится к наземному доступу к аэропорту из ближайшего городского района. Одним из примеров интермодального путешествия типа 1 является поездка на автобусе в аэропорт из дома, за которой следует авиаперелет на другой континент.

Интермодальность типа 2 возникает в результате интеграции аэропорта в региональные или национальные транспортные сети, особенно в сеть высокоскоростных железных дорог. Пример интермодального маршрута типа 2: из Нью-Йорка во Франкфурт самолетом, а затем поездом до Штутгарта. В данном исследовании основное

внимание уделяется интермодальности типа 2, в частности интеграции воздушного и железнодорожного транспорта. В интермодальности типа 2 [4] рассматриваются услуги на средние и дальние расстояния отдельно:

– услуги на короткие/средние расстояния протяженностью 100–300 км, при которых железная дорога работает как подъездная дорога к аэропорту, что, как считается, в основном влияет на конкуренцию в аэропортах;

– услуги на средние/дальние расстояния протяженностью 300–800 км, в которых железнодорожный транспорт заменяет воздушный транспорт, что в основном считается влияющим на конкуренцию в сфере авиа-железнодорожного транспорта.

Динамика интеграции железнодорожного транспорта в крупнейшие аэропорты мира

В настоящее время в мире насчитывается около 300 аэропортов, имеющих железнодорожное сообщение, но на различных стадиях планирования, проектирования или строительства

может появиться еще 400 железнодорожных линий. На рис. 1 представлена диаграмма динамики интеграции железнодорожного транспорта в крупнейшие аэропортах мира с 2006 по 2021 г. За обозначенный период наибольшее количество интегрированных в аэропорты железнодорожных линий находятся в Европе, число которых выросло за 15 лет в четыре раза. Привлекательность таких совмещенных транспортных тандемов за этот же период в Азии увеличилось в 8 раз, в США — в 5 раз.

Этот значительный рост обусловлен желанием улучшить транспортную доступность удаленных аэропортов в крупных городах и экологические показатели, а также предоставить выбор логистических маршрутов. Международная организация воздушного транспорта (IARO) находится в авангарде этих разработок, и ее члены извлекают выгоду из обмена передовым опытом и обучения тому, как планировать, строить и эксплуатировать воздушно-железнодорожные сообщения.

Анализ таких интегрированных схем показывает, что в каждом конкретном аэропорте

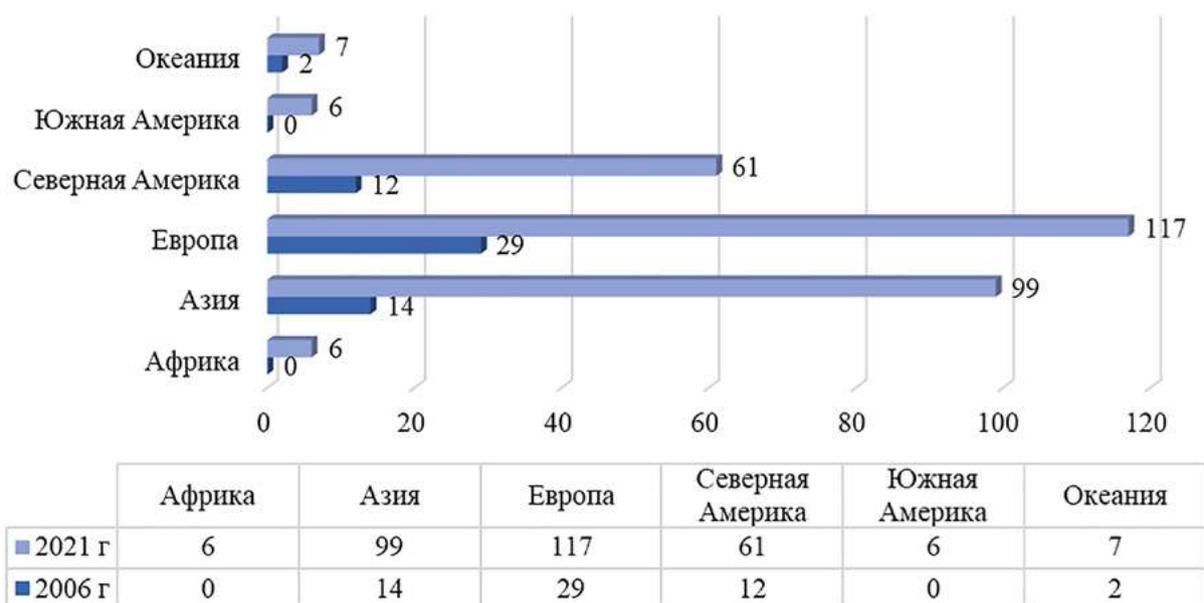


Рис. 1. График изменения количества интегрированных железнодорожных линий в крупнейшие аэропорты мира с 2006 по 2021 г.

ситуация индивидуальна и нет правильного или неправильного способа решения этого вопроса. Действительно, успех можно измерить несколькими способами, в зависимости от целей. Наиболее распространенным показателем является процент пассажиров, доставляемых без пересадок, пользующихся железнодорожным транспортом, — доля авиапассажиров в железнодорожном сообщении. Но в некоторых аэропортах железная дорога является лишь одним из нескольких устойчивых видов транспорта, и целью может быть максимальное увеличение общей доли общественного транспорта. В других аэропортах персонал может быть более значимым пользователем железнодорожного транспорта, поэтому доля персонала в железнодорожном сообщении также важна.

Итак, зачем аэропорту стремиться к максимальному увеличению доли железнодорожных перевозок? Улучшение доступности означает облегчение доступа авиапассажиров в аэропорт и обратно, что позволяет аэропорту привлекать больше пассажиров из более широкой зоны обслуживания. Большинство авиалиний обслуживают центр города или крупные жилые районы, но другие распространяются в других направлениях, связывая с пригородами, другими поселениями или даже отдаленными городами. Экологические показатели железных дорог, как правило, лучше, чем автомобильных, хотя их не следует преувеличивать, принимая во внимание углерод, используемый в строительстве и производстве электроэнергии. Обеспечение выбора является третьей целью, поскольку это позволяет пассажирам избегать ненадежных и перегруженных дорог, а также улучшает доступность для тех, кто, возможно, не желает пользоваться автомобилем или не имеет собственного автомобиля.

Эта третья цель также является ключом к понижению рынка авиационно-железнодорожных сообщений. Авиапассажиры обычно подразделя-

ются на категории с точки зрения цели поездки и места проживания. Цель поездки — в первую очередь работа или отдых. Часто нет большой разницы в склонности пользоваться общественным транспортом между деловыми пассажирами и пассажирами, путешествующими воздушными судами, но первые, как правило, ограничены во времени и не ограничены в деньгах и поэтому используют более быстрые и дорогие виды транспорта, в то время как у последней группы все наоборот. С другой стороны, местные жители, как правило, гораздо реже пользуются общественным транспортом и особенно железной дорогой, поскольку они чаще пользуются частными автомобилями или такси из своего дома. Посетители с большей вероятностью используют железные дороги для поездок в центр города и обратно. Конечно, всегда есть исключения, отсюда необходимость тщательного изучения каждой ситуации.

Конечно, у авиа-железнодорожного сообщения есть и недостатки для аэропортов. Один из них, который часто вызывает беспокойство, — это предполагаемая потеря доходов от парковки автомобилей. На самом деле это случается редко, поскольку аэропорту приходится предоставлять дорогостоящую парковку на окраине, возможно, включая трансфер на автобусе до терминала, и, возможно, было бы лучше использовать эту землю для других, более прибыльных видов деятельности. Еще одна трудность может заключаться в оплате авиа-железнодорожного сообщения, поскольку проекты железнодорожной инфраструктуры редко приносят прибыль в прямом финансовом смысле. Хотя существует несколько авиационно-железнодорожных линий, которые не зависят от государственных субсидий, большинство железнодорожных систем поддерживаются государством, даже если они предоставляются частным сектором. Это означает, что аэропорты иногда просят внести свой вклад в железнодорожное сообщение, что, в свою оче-



Рис. 2. График распределения различных типов железнодорожного транспорта в 150 крупнейших аэропортах мира

редь, означает, что авиакомпании и их клиенты, авиапассажиры, должны покрывать расходы. Авиакомпании не всегда принимают это, хотя во многих ситуациях предоставление аэропортом станции стало нормой.

Авиационно-железнодорожное сообщение может дополнять другие услуги и приносить значительный доход железнодорожным операторам. У авиапассажиров, как правило, другие схемы поездок, чем у пассажиров пригородного сообщения, и поэтому они могут более эффективно использовать инфраструктуру и ресурсы, а также, как правило, готовы платить не дисконтированную цену.

В мировой практике склонны группировать авиа-железнодорожные сообщения по пяти типам: легкорельсовые, метро, региональные линии, специальные аэропортовые экспрессы и междугородние/высокоскоростные [5, 6]. График распределения различных типов железнодорож-

ного транспорта в крупнейших аэропортах мира представлен на рис. 2.

Концепции планировочных решений интермодальных пересадочных узлов

Обзор крупнейших аэропортов мира с высокими показателями интеграции железнодорожных станций заключается в том, что не все они в какой-то степени копируют друг друга. Речь идет о компоновке объемно-планировочных решений аэропортов и железнодорожных станций.

Существуют единичные примеры совместного проектирования глобальных, заранее продуманных, пересадочных узлов с развитой сетью примыкающих транспортных сетей. К ним можно отнести станции аэропортов Осло, Гатвик и Лондон-Станстед.

Чаще всего железнодорожная линия развивается как отдельный проект для связи города с уже существующим аэропортом для эффектив-

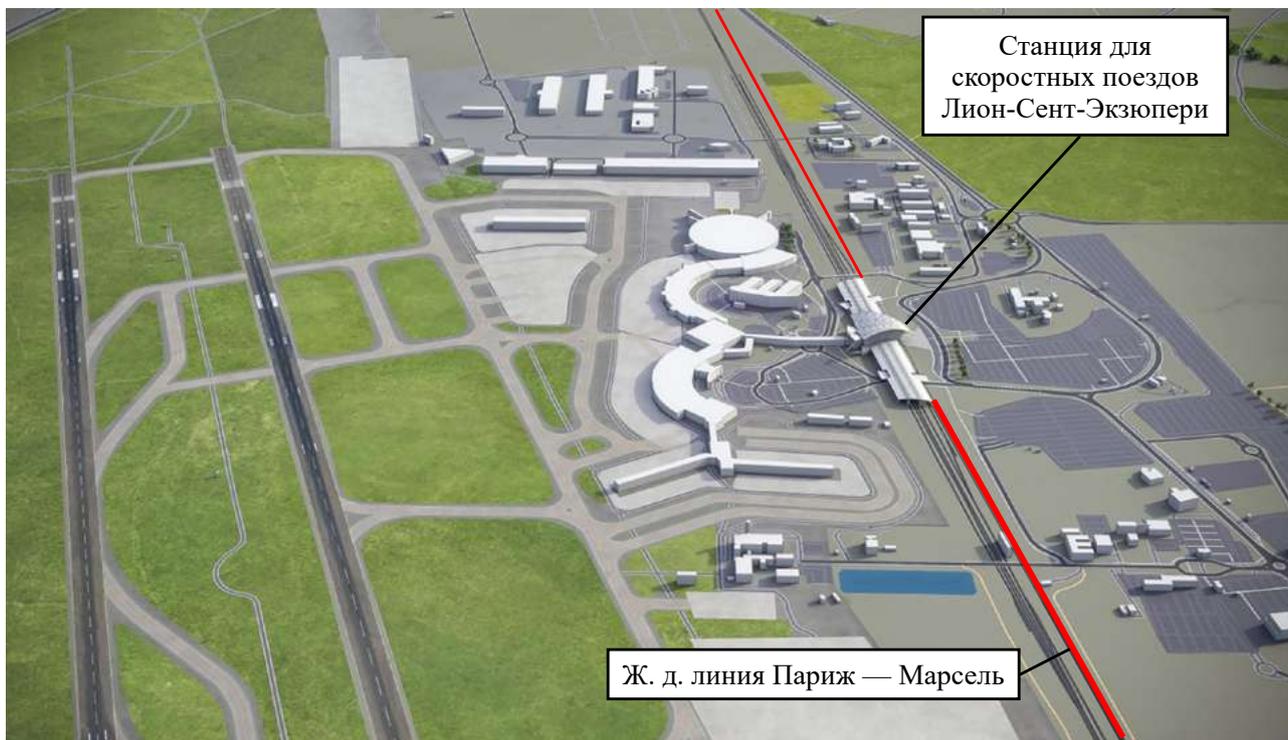


Рис. 3. Международный аэропорт Лион-Сент-Экзюпери. Станция высокоскоростной железнодорожной линии и станций дальнего следования. SEA 3D-модель (источник: www.turbosquid.com)

ного сообщения скоростным стабильным видом транспорта. В подавляющем большинстве проектов объемно-планировочное решение интермодальных узлов создается как комплекс отдельных зданий, возведенных в разное время и связанных между собой транспортными коридорами или транспортом.

Анализ крупнейших аэропортов мира показал, что существуют различные схемы интеграции с железнодорожным транспортом. В общем случае можно выделить три основных концепции [7].

Концепция планирования № 1: полная интеграция линии железнодорожного транспорта в аэропорт. Такая концепция позволяет добиться наибольшего комфорта для пассажиров и свести к минимуму протяженность пешего маршрута от платформы прибытия поезда до терминала аэропорта.

Данная концепция полной интеграции железнодорожного транспорта в инфраструктуру аэро-

порта допускает две основные схемы объемно-планировочного решения пересадочного узла.

Первая схема подразумевает размещение железнодорожной линии и инфраструктуры аэровокзала в одном уровне. Первым аэропортом, реализовавшим такую схему объемно-планировочного решения пересадочного узла, стал лондонский Гатвик, открытый в 1958 году. Он включал в себя железнодорожный вокзал, автобусную станцию и зал ожидания для прибывших на автомобиле.

Особенностью данного аэровокзального комплекса является его расположение на национальной железнодорожной линии. Данное решение позволяет пассажирам подъезжать к месту отправления не только с прилегающих городских районов Лондона, но и из региональных областных центров, расположенных по пути следования поезда. Другими примерами строительства транспортной инфраструктуры с «чистого поля»

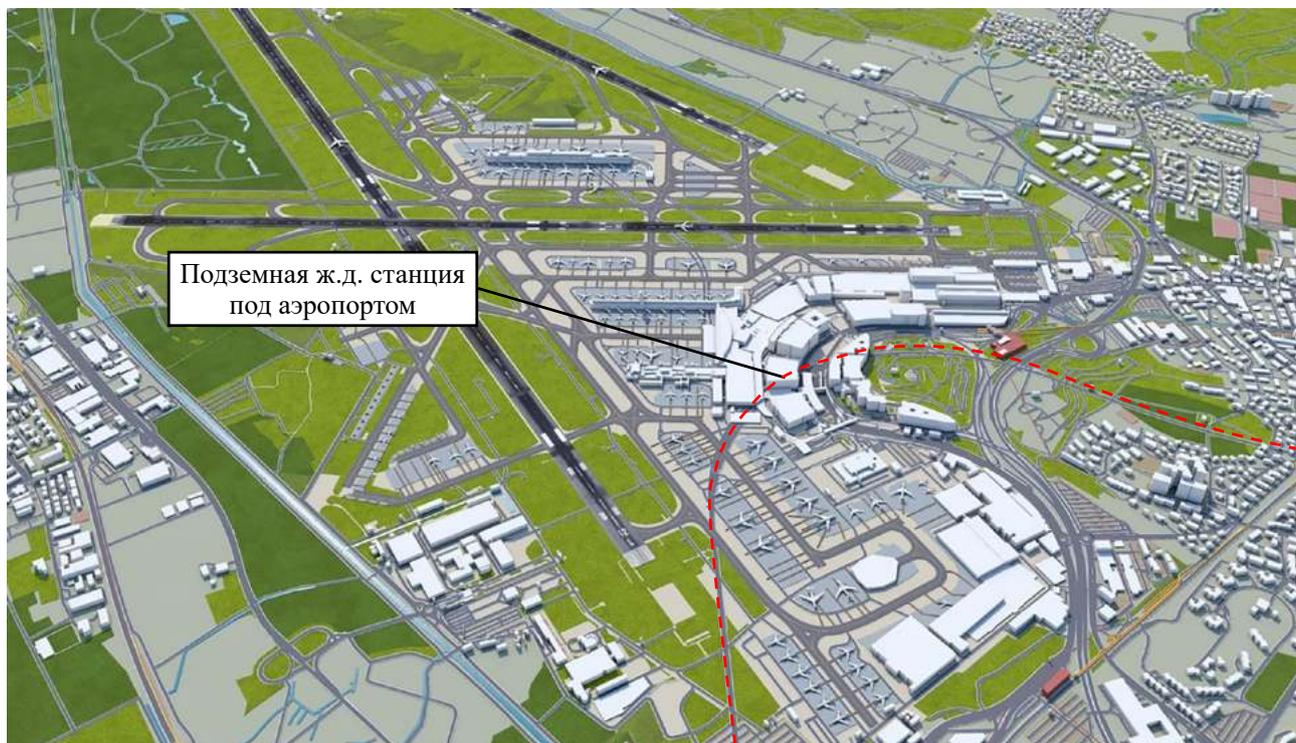


Рис. 4. Международный аэропорт в Цюрихе с интегрированной подземной ж. д. станцией. SEA 3D-модель (источник: www.turbosquid.com)

являются проекты аэровокзалов Осло (Норвегия) и Лион (Франция), в которых изначально было запроектировано включение железнодорожных станций дальнего следования (рис. 3).

Вторая схема подразумевает интеграцию ответвления от главного пути железнодорожной линии в существующую инфраструктуру аэровокзала с помощью железнодорожного тоннеля к зданию аэровокзала. Впервые такое объемно-планировочное решение было реализовано в Цюрихе в 1980 году (рис. 4).

Положительный опыт в последующем применили и другие аэропорты таких городов, как: Амстердам, Франкфурт, Женева и Копенгаген. В большинстве аэропортов тоннельные варианты трассы являются частью ответвленных от существующих железнодорожных линий. Исключение составляет аэропорт Копенгагена, в котором тоннель был построен по границе аэро-

порта и расположен на трассе новой железнодорожной линии.

В рамках относительно недавнего проекта в июне 2012 года был открыт железнодорожный тоннель под аэропортом Брюсселя, который расположен на вновь проложенной линии железной дороги к северу от аэропорта. Данная линия предназначена для организации междугороднего сообщения на линии Париж — Брюссель — Антверпен — Амстердам.

Иногда интеграции железнодорожного транспорта в инфраструктуру аэровокзальных комплексов препятствует ограниченное пространство зданий терминалов аэровокзалов. Зачастую большинство зданий терминалов аэропортов не предусмотрены для размещения железнодорожных станций. В этом случае необходима полная или частичная реконструкция терминала. Построенный в середине XX века аэропорт в Гат-

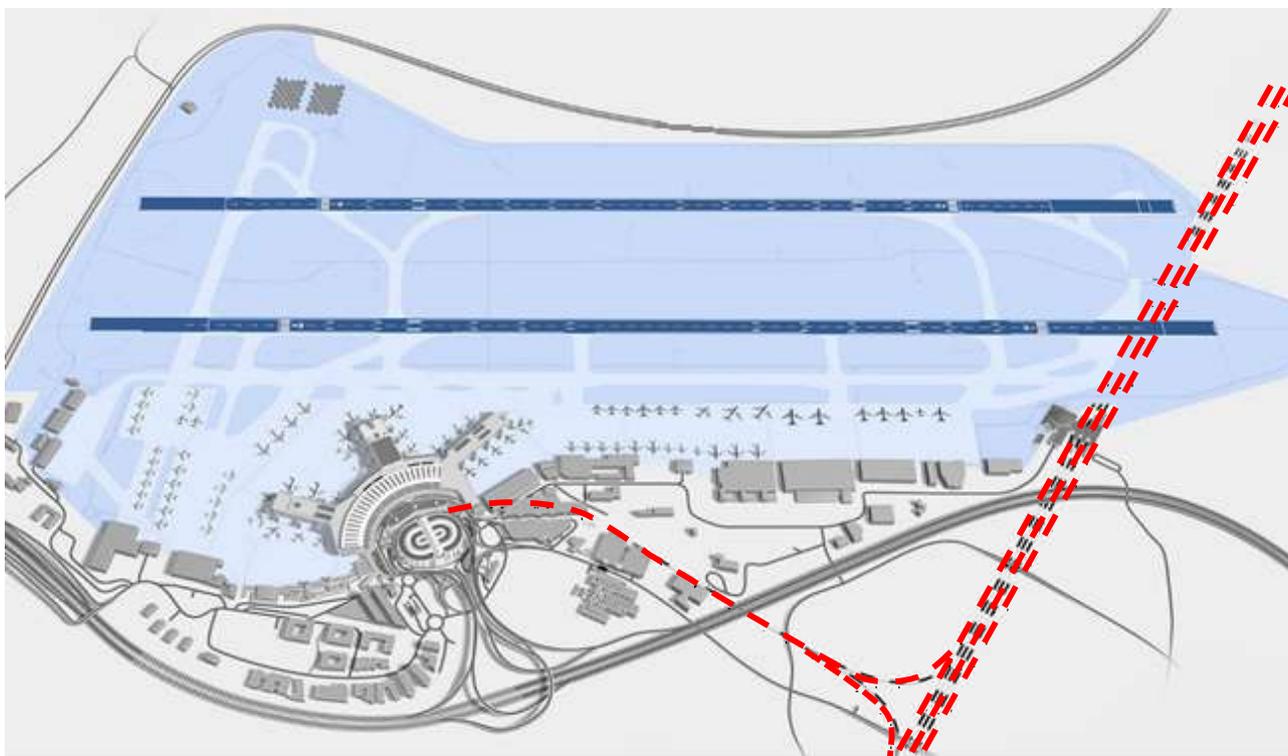


Рис. 5. Международный аэропорт Дюссельдорфа с отдельной железнодорожной станцией на железнодорожной магистрали в точке, максимально приближенной к комплексу пассажирских терминалов аэропорта. SEA 3D-модель (источник: www.turbosquid.com)

вике подвергся реконструкции за счет возведения нового терминала «Северный терминал».

Подобным образом был решен вопрос в аэропорту Франкфурта. Для развития аэропорта рядом с существующим терминалом было возведено здание нового терминала, отделенное от существующего железной дорогой. Прибывающие пассажиры пригородного и дальнего следования прибывают непосредственно в здания терминалов на соответствующие станции аэропорта Франкфурта, расположенные в разных терминалах. Такая схема вызвана отсутствием финансирования на строительство железнодорожной станции. Поэтому в одном из крупнейших аэропортов Европы Франкфурте было разработано компромиссное решение, в соответствии с которым пассажирам дальнего следования предлага-

ется зал регистрации в пределах аэровокзального комплекса.

Другой вариант реконструкции был принят в аэропорту Цюриха. Внутреннее пространство терминала не подверглось изменениям, а расширение произошло за счет реконструкции мезонинного уровня железнодорожного вокзала в пределах существующего авиа/железнодорожного комплекса. Это позволило существенно увеличить пропускную способность аэропорта. Первоначальный генеральный план международного аэропорта Париж — Шарль-де-Голль не предусматривал прямого железнодорожного сообщения с пассажирскими терминалами. Но со временем велось расширение аэропорта. Для организации доступа железной дороги для обслуживания терминала «2» генеральный план был изменен. В настоящее

время сюда прибывают пассажиры, следующие по международному скоростному маршруту.

Концепция планирования № 2: организация движения до близлежащей линии железной дороги. Эта концепция основана на построении отдельной железнодорожной станции аэропорта на железнодорожной магистрали в точке, максимально приближенной к аэровокзалному комплексу аэропорта. Такая концепция планировки особенно актуальна для интеграции с высокоскоростными междугородними перевозками, где нормы проектирования линий в плане и профиле отвечают более жестким требованиям и не позволяют изменить трассу, приблизив ее к границам аэропорта.

По такой концепции развивался аэропорт Дюссельдорфа. Для этого было решено проложить новую ветку длиной 2,4 км до ближайшей точки на трассе высокоскоростной линии HSR в дополнение к уже существующему глубокому вводу пригородной линии в терминал (рис. 5). Для этого в аэропорту была проложена линия монорельсовой дороги, которая соединяет пассажирские терминалы аэропорта. Подобная транспортная схема реализована между железнодорожной магистралью и тремя терминалами аэропорта в Ньюарке (США), поскольку основная железнодорожная линия не была перенесена ближе к аэропорту.

Концепция лондонского аэропорта Хитроу основана на идее присоединения аэропорта к железнодорожной магистрали с помощью автоматизированной системы перевозки пассажиров *people-mover*.

Парижский аэропорт Орли был первым европейским аэропортом, где была реализована автоматизированная транспортная система *Orlyval*. Данная система осуществляет перевозку пассажиров в автоматизированном режиме к существующей железнодорожной станции. Однако дальнейшее развитие аэропорта не предполагается.

Часто экономически выгодно подвести железную дорогу как можно ближе к терминалам. При этом интеграции с зданиями аэровокзала стараются избегать. Примером такой железнодорожной станции с междугородним железнодорожным сообщением является аэропорт Манчестера (Великобритания), где переходы длиной в среднем около 300 метров соединяются со зданиями аэровокзала аэропорта путем обустройства траволаторов.

Анализ решений, реализованных в аэропортах в рамках данной концепции, показал, что не все предлагают прямые маршруты до терминалов. Многие аэропорты прибегают к использованию дополнительных транспортных систем, которые выполняют короткие челночные рейсы. Как отмечалось ранее, пользователи железных дорог дальнего следования в аэропортах Франкфурта, CDG в Париже и Гатвик в Лондоне используют трансфер, чтобы добраться до терминала регистрации. Это обстоятельство сильно влияет на общее время в пути.

Концепция планирования территории № 3: подключение к железнодорожным вокзалам.

Обзор основных концепций планирования площадок показывает, что многие аэропорты решили не осуществлять междугородние перевозки на аэродромные площадки или рядом с ними. В эту группу входят аэропорты Лондона (Хитроу), Мадрида, Барселоны, Вены, Мюнхена и Гамбурга, Москвы. Все перечисленные аэропорты имеют железнодорожное сообщение с железнодорожными вокзалами в центре города (рис. 6).

Официальный план развития одного из крупнейших аэропортов мира Хитроу состоит в том, чтобы включить в транспортную интермодальную цепь линию высокоскоростной железной дороги HS2. В зоне пересечения высокоскоростной линии со строящейся скоростной линией Crossrail, новым видом общественного транспорта Лондона, запла-



Рис. 6. Схема подключения аэропортов Москвы к железнодорожным вокзалам в центре города (источник: <https://travelsoul.ru/wpcontent/uploads/0/b/7/0b7f6f805f1d04cca8e8741cb763b370.jpeg>)

нирован пересадочный узел, к которому пассажиров, путешествующих из аэропорта, будут доставлять шаттлом. Другим примером данной стратегии был план соединения аэропорта Мюнхена с центральным вокзалом в центре города линией магнитолевитационного транспорта, но после трагедии от этого плана отказались.

Критическая оценка концепций планировочных решений интермодальных пересадочных узлов

Основываясь на обзоре примеров развития интеграции железнодорожного и авиационного транспорта, можно выделить положительные и отрицательные моменты каждой из трех концепций.

Изменение плана трассы магистральной железнодорожной линии для ввода в аэропорт обходится дорого. Исключение могут составлять проекты, при которых аэропорт и железнодорожная ветка аэропорта будут построены одновременно (концепция № 1).

Ожидать реализацию большого количества проектов, по данной концепции связанных с изменением направления магистралей, как, например, в Амстердаме или Цюрихе, не стоит. Также маловероятно повторение проектных решений в аэропорту Осло или Берлина, где строительство новой трассы осуществляется одновременно с терминалами.

Данная концепция интеграции, хотя и требует значительных финансовых затрат, обеспечивает наибольший комфорт для авиапассажиров за счет исключения изнурительных пешеходных маршрутов в зонах пересадок. Это преимущество может быть определяющим для выбора аэропорта в больших городах, имеющих несколько воздушных гаваней.

Соединить аэропорт и существующую железнодорожную линию с помощью вспомогательного транспортного средства (концепция № 2) для перевозки людей будет дешевле, чем перестраивать железнодорожную магистраль. Это было сделано в аэропорту Дюссельдорфа с пересадкой на станцию междугороднего сообщения, а также в Париж-Орли, который соединялся со станцией без междугороднего сообщения. Данная концепция на первый взгляд экономически наиболее привлекательна, но она требует значительных затрат на развитие вспомогательных транспортных систем и особого режима координации транспортных систем аэропорта.

Организация высококачественного и комфортабельного железнодорожного сообщения из аэропорта до железнодорожной станции или вокзала (концепция № 3) может обеспечить наивысший уровень взаимодействия транспортных

систем, даже если эта железнодорожная станция находится далеко от аэропорта. Но как бы грамотно и четко это решение не было реализовано, такая концепция сводит к минимуму восприятие пассажирами удобства данного маршрута, а продолжительность поездки может составить то же время, сопоставимое с затраченным на полет.

Выводы

Исследование европейского и азиатского опыта использования скоростного движения в качестве единственной вспомогательной функции для дальних авиаперевозок показывает, что достигнутые успехи в аэропортах Франкфурта и Парижа трудно будет повторить в других странах Европы. Дальнейшее развитие концепции интермодальных услуг, за исключением существующих примеров, как из аэропорта Париж-CDG в Брюссель и из Франкфурта в Кельн, может быть маловероятным. В то же время в Китае этот вид интеграции очень активно развивается, но конкретных оценок пока не освещено в литературе, поскольку скорость развития железнодорожного транспорта превышает все существующие исторические рекорды.

Многие города мира не сочли нужным прокладывать железные дороги дальнего следования в аэропорты: Мадрид является примером неудачных инвестиций в новую железнодорожную систему, которая плохо интегрируется с аэропортами. Скоростное движение осуществляется до двух станций в центре Мадрида, только одна из которых связана напрямую с аэропортом по железной дороге.

Таким образом, можно подытожить, что в Европе как основоположнице развития интермодальных перевозок, так и на других континентах, не существует универсальной стратегии развития интеграционных схем железнодорожно-авиационного сообщения. Данные о доходах, представленные в этом тематическом исследовании,

убедительно свидетельствуют о том, что высокая доля железнодорожных перевозок для дополнительных поездок не может быть достигнута только за счет качества проектирования. Примеры исследования подтверждают концепцию, согласно которой качество проектирования в аэропорту само по себе не может объяснить преимущество от использования железнодорожного сообщения с крупными аэропортами. Очевидно, что здесь играют роль и другие факторы, такие как: иные виды авиаперевозок, доля внутренних и международных маршрутов, предлагаемые в аэропорту пребывания; доля авиапассажиров в железнодорожном сообщении; максимальное увеличение общей доли общественного транспорта; немалую роль играет доля пассажиров — персонал аэропорта.

В тематических исследованиях изучались лучшие мировые примеры интермодальных проектов и железнодорожных станций в аэропортах. Это позволило автору выявить пять важнейших факторов успеха: степень интеграции инфраструктур, сетевой контекст, общее время в пути и время пересадки, интегрированное оформление билетов и информации.

Факторы управления также оказались ключевыми, определяющими успех планирования, реализации и эксплуатации этих проектов с участием нескольких операторов, которые требуют высокого уровня координации.

Проекты интермодальных авиа-железнодорожных перевозок требуют значительных капиталовложений в строительство и значительных эксплуатационных расходов, серьезной мотивации для реализации амбициозных целей, тесного сотрудничества между участниками концессии. Несмотря на то, что в целом существуют рекомендации по передовой практике интермодальных перевозок, похоже, не существует универсального решения для проектирования интермодальных пересадочных узлов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. EC (2006b): Air and Rail Competition and Complementarity, final report. Produced by Steer Davis Gleave London for the European Commission, DGTREN. — URL: http://ec.europa.eu/transport/rail/studies/doc/2006_08_study_air_rail_competition_en.pdf.

2. EUROCONTROL (2004a): Review of the current intermodality situation. CARE II: The airport of the future: Central link of intermodal transport? European Organisation for the Safety of Air Navigation. URL: <http://www.eurocontrol.int/careinnov/gallery/content/public/docs/innov2/m3/WP1%204.0.pdf>.

3. EC (1997): Intermodality and intermodal freight transport in the European Union. Brussels: European Commission COM (97) 243. — URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1997:0243:FIN:EN:PDF>.

4. EC (2011): European Commission White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area — Towards a competitive and resource efficient transport system. Brussels: European Commission COM (2011) 144. — URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF>.

5. Шелгунов О. О. Совершенствование конструктивного решения однопутных тоннелей на высокоскоростных железнодорожных магистралях с учетом аэродинамических процессов / О. О. Шелгунов, В. Н. Кавказский // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2022. — С. 83–87.

6. Ledyayev A. P. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo” / A. P. Ledyayev, V. N. Kavkazsky, E. Davidenko // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. — Switzerland, 2022. — Pp. 28–36.

7. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015. Integrating Aviation and Passenger Rail Planning. — Washington, DC: The National Academies.

Дата поступления: 27.01.2025

Решение о публикации: 16.02.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доц.; Kavkazskiy_vn@mail.ru

Analysis of Global Trends in the Development of Intermodal Transfer Hubs Based on International Airports

V. N. Kavkazskiy

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kavkazskiy V. N. Analysis of Global Trends in the Development of Intermodal Transfer Hubs Based on International Airports // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 134–147. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-134-147

Summary

Purpose: To analyse different aspects of air and rail transport interaction; to determine design features of intermodal complexes and transportation hubs; to develop a concept of an airport intermodal transfer hub.

Methods: Experimental and theoretical methods based on the data analysis and verification; systematization, identification of dependencies and determination of cause-and-effect relationships. **Results:** The analysis

conducted made it possible to obtain full information on designing a tunnel at active airports. The criteria for an effective interaction of air and rail transport have been determined. The specific features of rail transport integration into the airport infrastructure have been established.

Keywords: Intermodality, tunnel, underground terminal, interaction of air and rail transport, light rail transport, metro, aeroexpress, high-speed lines.

References

1. EC (2006b): Air and Rail Competition and Complementarity, final report. Produced by Steer Davis Gleave London for the European Commission, DGTREN. Available at: http://ec.europa.eu/transport/rail/studies/doc/2006_08_study_air_rail_competition_en.pdf.

2. EUROCONTROL (2004a): Review of the current intermodality situation. CARE II: The airport of the future: Central link of intermodal transport? European Organisation for the Safety of Air Navigation. Available at: <http://www.eurocontrol.int/careinnov/gallery/content/public/docs/innov2/m3/WP1%204.0.pdf>.

3. EC (1997): Intermodality and intermodal freight transport in the European Union. Brussels: European Commission COM (97) 243. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1997:0243:FIN:EN:PDF>.

4. EC (2011): European Commission White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area — Towards a competitive and resource efficient transport system. Brussels: European Commission COM (2011) 144. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:EN:PDF>.

5. Shelgunov O. O., Kavkazskiy V. N. Sovershenstvovanie konstruktivnogo resheniya odnopusnykh tonneley

na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh s uchetom aerodinamicheskikh protsessov [Improving the design solution for single-track tunnels on high-speed railway lines taking into account aerodynamic processes]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Transport: problems, ideas, prospects: collected papers of the LXXXII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. 2022, pp. 83–87.

6. Ledyayev A. P., Kavkazskiy V. N., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport “Domodedovo”. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. Switzerland, 2022, pp. 28–36.

7. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015. Integrating Aviation and Passenger Rail Planning. Washington, DC: The National Academies.

Received: January 27, 2025

Accepted: February 16, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; Kavkazskiy_vn@mail.ru

УДК 629.4.016.1

О возможности применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» при разработке энергооптимальных режимов ведения поездов

С. Н. Журавлев¹, Т. С. Авсиевич¹, В. П. Гриневич¹, Д. Н. Курилкин²

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Российской Федерации, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Журавлев С. Н., Авсиевич Т. С., Гриневич В. П., Курилкин Д. Н. О возможности применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» при разработке энергооптимальных режимов ведения поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 148–159. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-148-159

Аннотация

Цель: Экономия топлива является одной из ключевых задач, стоящих перед железнодорожным транспортом. Решению задачи поиска энергооптимальных режимов ведения поезда в различных эксплуатационных условиях служит программный комплекс «Тяга — Прогноз», использование алгоритмов которого в программах автоведения поезда затруднено из-за необходимости выполнения большого объема вычислений в реальном режиме времени. Актуальность применения энергосберегающих режимов ведения поездов, определенных по алгоритмам программного комплекса «Тяга — Прогноз», обусловлена необходимостью совершенствования методов управления локомотивами. Подтверждением аддитивности определяемых режимов практически устанавливается возможность реализации алгоритма «киевский веник» при решении тягово-энергетических задач программным комплексом «Тяга — Прогноз», резко уменьшающего количество выполняемых шагов при определении энергооптимального режима. Предложены решения по сокращению вычислительного объема режима ведения поезда без заметных потерь в топливе. **Методы:** Методом исследований является сравнение значений расхода топлива для поездов, определенных при расчете энергооптимального режима для всей железнодорожной линии с суммой затрат топлива, определенных по тем же правилам, но по отдельным перегонам железнодорожной линии. **Результаты:** Сформулирован вывод о подтверждении аддитивности энергосберегающих режимов ведения поездов, определенных по алгоритмам программного комплекса «Тяга — Прогноз» для единой железнодорожной линии и отдельных ее перегонов с погрешностью менее 2 %. **Практическое применение:** Алгоритмы программного комплекса «Тяга — Прогноз» могут быть применены в программах автоведения поездов.

Ключевые слова: Программный комплекс, тяговые расчеты, оптимальное управление, энергооптимальный режим, аддитивность, терминология.

Экономическая целесообразность любого производственного процесса может быть охарактеризована поддержанием экстремального значения некоторого определяющего технико-экономического показателя.

Перевозочный процесс относится к процессам, обладающим большой инерционностью и управляющимся входными координатами объекта через дискретные промежутки времени. Входные координаты перевозочного процесса —

это параметры, определяющие изменение режимов ведения поезда, которые включают набор позиций контроллера машиниста, режим холостого хода, позиции электрического реостатного тормоза и регулируемую величину тормозной силы пневматического тормоза одиночного локомотива и всего поезда.

Изменение режимов ведения поезда дает возможность реализации большого диапазона управления перевозочным процессом, в том числе обеспечивая возможность формирования режимов, формирующих оптимальные технико-экономические показатели.

Между тем основная задача автономных систем автоведения поездов сводится не к экономической эффективности, а к выполнению заданного графика движения.

В настоящее время управление движением поездами связывают с реализацией энергооптимальных режимов ведения. В этом случае при соблюдении графика движения выходной координатой становится расход энергоресурсов. В настоящее время распространено применение термина «энергооптимальный режим», характеризующий эффективность любых режимов.

Фактическими **энергооптимальными** режимами следует считать такие управляющие воздействия, которые обеспечивают минимальный расход топлива при заданной массе поезда и маршруте следования без жесткой связи со временем хода по железнодорожному участку. Многовариантность формирования режимов управления тяговым подвижным составом может привести к тому, что близкое к минимальному значению расхода энергоресурсов за поездку может быть получено при нескольких комбинациях режимов управления. Комбинацию режимов управления, обеспечивающих минимальный расход топлива при заданном графике движения, корректно называть **энергосберегающими**. При данной комбинации режимов управления рас-

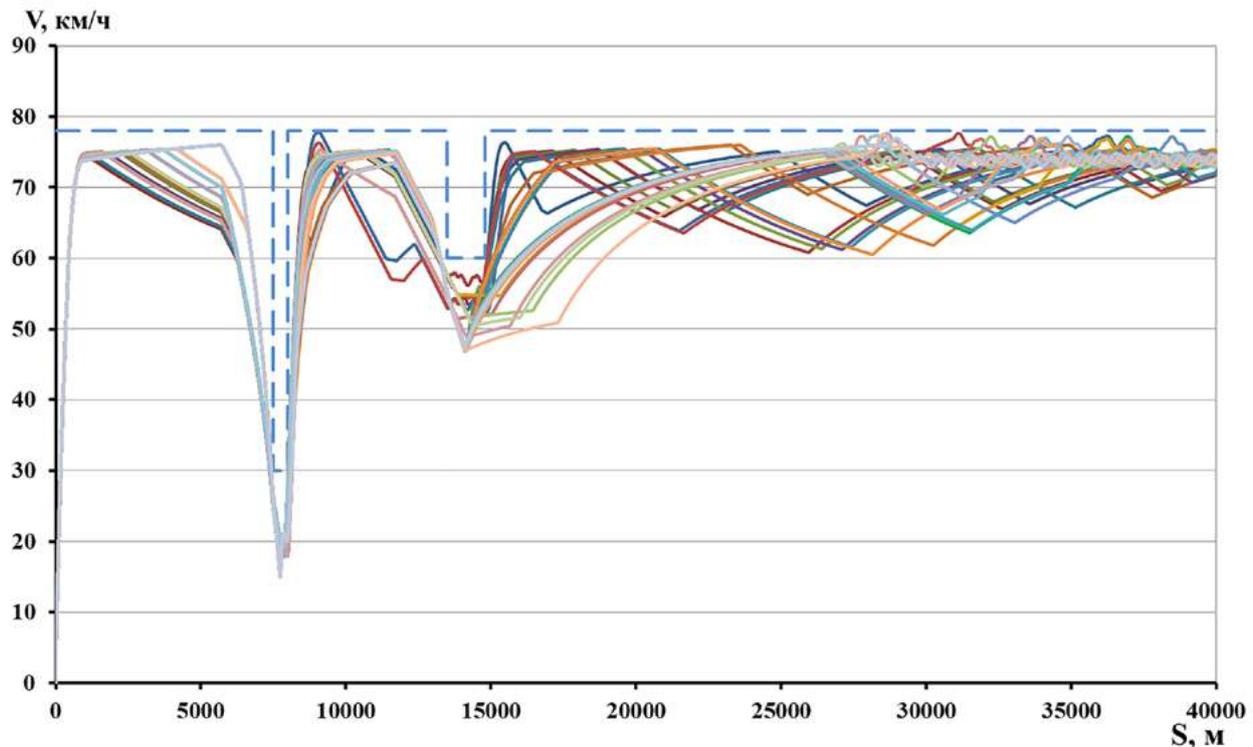
ход топлива, скорее всего, окажется несколько больше, чем при энергооптимальной комбинации режимов управления. Режимы ведения поезда, в которые не заложены непосредственно вычисление расхода топлива, а назначенные с целью соблюдения времени хода или с другой технико-экономической целью, предлагаем считать **ресурсосберегающими**.

Автономные системы автоведения поездов в зависимости от того, где выполняется расчет необходимых комбинаций управляющих воздействий, принято разделять на системы с предварительно рассчитанными траекториями и системы, определяющие управляющие воздействия непосредственно в процессе движения [1]. К последним системам следует отнести системы беспилотного управления поездом [2].

К системам с предварительно рассчитанной комбинацией режимов управления следует отнести методы оперативных тяговых расчетов, обеспечивающие повышение энергоэффективности автономных локомотивов.

График движения конкретного поезда задается в виде режимной карты для каждого локомотива с учетом сопротивления движению определенного состава на заданном маршруте. Недостатком таких режимных карт является «необходимость изготовления таких программ в большом количестве по числу поездов, а также создание большого и довольно сложного хозяйства по расчету и изготовлению таких программ, их правильной раздачи на локомотивы и своевременной замены другими, в случае изменения условия движения или износа и повреждения программносителя» [1].

К программам, которые ведут расчет непосредственно в процессе движения, следует отнести унифицированные системы автоведения поезда УСАВП и УСАВП-Л, применяемые на электропоездах. Кроме регулирования режима тяги, система обеспечивает прицельное торможение при приближении к светофорам или к местам,



Фрагмент расчетов по ПК «Тяга — Прогноз» начала движения поезда с возможными траекториями режимов движения поезда с учетом ограничения по допустимой скорости движения (пунктирная линия)

требующим ограничения скорости движения. Системами автоматического ведения поезда оборудовано некоторое количество электровозов различных серий.

Программный комплекс «Тяга — Прогноз» определяет энергооптимальный режим движения локомотива с составом заданной массы на основе анализа различных режимов ведения поезда, охватывающих все поле с координатами «скорость — путь» [3–5].

Каждый из рассматриваемых программой наборов режимов управления обеспечивает выполнение всех временных и постоянных ограничений по скорости движения. Комбинации режимов управления отличаются различным сочетанием использования позиций контроллера машиниста, режимов выбега и регулировочных торможений. На рисунке показан фрагмент выполненного расчета, на котором при помощи

различных режимов, получаемых в результате вариативного управления позициями контроллера машиниста и регулировочным торможением, поезд проследует участок, имеющий локальное ограничение допустимой скорости движения. Особенностью реализации режимов, представленных на рисунке по различным траекториям управления, является выдержка одинакового времени хода поезда по участку для всех вариантов. При этом расход топлива за поездку имеет существенное отличие для рассматриваемых комбинаций режимов управления.

Выбор одного из режимов, имеющих наименьший расход топлива, можно считать однозначным нахождением энергооптимальной комбинации режимов ведения поезда.

В качестве примера выбора энергооптимального режима из 30 комбинаций режимов ведения поезда в табл. 1 и 2 приведено распределе-

ние режимов ведения поезда по позициям, время хода по участку, число смен позиции контроллера и расход топлива за поездку. В качестве объекта расчета использован поезд, включающий в себя тепловоз 2ТЭ25К^М и 60 порожних полувагонов. Было принято условие движения без промежуточных остановок по реальному железнодорожному участку 1-й категории сложности с действующими постоянными ограничениями.

Общее заданное время хода для всех вариантов, приведенных в табл. 1, принималось равным 225 мин. Отклонение времени хода среди рассмотренных 30 вариантов различных режимов движения от среднего значения составило $\pm 0,4$ %, за исключением двух выбросов величиной в 1,7 %. Характерно, что при одном из этих выбросов получен минимальный расход топлива. Результаты расчета показали, что при максимально полученном отклонении времени хода в 1,7 % возможен разброс значений расхода топлива в 4,6 %.

Анализируя результаты, приведенные в табл. 1, можно отметить, что расход топлива несколько меньше при большем времени хода и существует нечетко выраженная тенденция уменьшения числа переключений позиций контроллера машиниста при меньшем времени хода поезда по участку. Следует отметить, что влияние переходных процессов на величину силы тяги и расхода топлива в расчетах не учитывалось [5, 6].

Различия в получаемых результатах становятся значительнее при реализации режимов ведения поезда за минимально возможное время хода (табл. 2). Получаемое при этом разное значение времени хода в рассматриваемых вариантах расчета обусловлено требованиями, накладываемыми программой на законы формирования режимов управления поездом.

В результате расчетов получено, что при 30 различных комбинациях режимов ведения поезда время хода составило от 192,2 до 245,86 минуты. Расход топлива при этом изменяется в преде-

лах от 1386,4 до 1104,9 кг. Результаты расчета подтвердили достаточно очевидный факт, что с увеличением перегонного времени хода расход топлива на перемещение поезда уменьшается. Например, в вариантах 25 и 27, приведенных в табл. 2, при близких значениях времени хода 245,79 и 245,8 минут расход топлива составил 1083,3 и 1104,9 кг соответственно.

В то же время при минимальных значениях времени хода в диапазоне от 192,2 до 193,4 минуты, полученных в вариантах 1–6, минимальный расход топлива за поездку оказался максимальным и составил от 1349 до 1386,4 кг.

Разброс значений расхода топлива составил 286 кг, что составляет ± 23 % от среднего значения расхода топлива (1231 кг) для всех рассмотренных вариантов комбинаций режимов ведения поезда.

При этом расход топлива и время движения коррелируются с числом прямых переключений позиций контроллера машиниста, необходимых для обеспечения заданного варианта движения. В целом большее число прямых переключений и больший расход топлива имеют место при уменьшении времени хода поезда по участку.

В табл. 1 и 2 номера вариантов режимов ведения поезда идентичны и характеризуются величиной заданного диапазона изменения скорости движения от управляющего воздействия и расстояния прогнозирования траектории движения поезда [3, 4].

С учетом выполнения требований к соблюдению графика движения: по заданному времени хода или соблюдении минимально возможного времени хода должна проводиться отбраковка неэффективных вариантов.

Очевидно, что строгое соблюдение графика движения поезда на всем участке практически невозможно. График движения может быть нарушен при наличии временных ограничений скорости движения, задержки с отправлением на

Таблица 1. Расчетные режимы работы тепловоза 2ТЭ25К^М с составом из порожних вагонов массой 1500 т по участку 1-й категории сложности с соблюдением общего для всех режимов времени хода

№ варианта режима ведения поезда	Время работы на позициях контроллера машиниста, мин															Число прямых переключений	Расход топлива, кг		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15	
	1	19,00	1,60	6,93	11,53	89,01	77,81	3,25	1,37	5,37	1,14	3,21	2,26	0,36	0,25			0,24	1,99
2	18,1	3,81	2,2	7,23	106,14	69,97	1,89	5,87	0,78	0,87	5,07	0,48	0,44	0,38	0,3	1,87	225,4	193	1149,8
3	15,42	4,36	4,07	10,55	90,12	82,39	1,47	5,39	0,68	6,19	0,65	0,94	0,52	0,18	0,16	1,69	224,78	152	1162
4	18,14	1,35	1,54	12,74	87,68	84,11	7,11	4,02	3,49	0,47	0,82	0,93	0,46	0,25	0,2	1,53	224,84	152	1164,5
5	15,46	3,82	2,07	11,95	93,54	78,45	7,44	7,48	0,47	0,48	0,47	0,63	0,82	0,45	0,13	1,53	225,19	184	1160,4
6	12,28	3,93	2,31	12,3	90,28	93,32	2	3,96	0,33	0,93	0,96	0,51	0,15	0,14	0,13	1,53	225,06	146	1164,9
7	20,48	1,18	14,22	12,47	54,89	90,71	8,35	0,86	13,81	0,63	3,71	0,6	0,48	0,3	0,18	2,3	225,17	101	1189,5
8	23,5	0,9	1,48	15,89	60,49	97,29	6,8	13,35	0,29	0,33	0,74	1,23	0,15	0,13	0,12	2,22	224,91	59	1188,5
9	17,01	0,89	6,27	14,16	63,58	101,67	6,92	8,73	0,29	0,4	1,06	0,76	0,14	0,14	0,12	2,17	224,31	54	1192,3
10	15,93	0,9	6,71	14,28	64,13	101,48	15,59	0,45	0,37	0,5	1,53	0,13	0,14	0,15	0,14	2,09	224,52	49	1188,1
11	11,59	1,16	8,91	4,48	155	11,21	13,55	12,68	1,11	1,43	4,03	0,43	0,39	0,3	0,28	2,07	228,62	138	1140,2
12	13,86	1,87	6,53	6,2	139,61	4,07	34,56	15,46	0,68	0,77	0,6	0,5	0,47	0,49	0,38	1,61	227,66	139	1159,1
13	18,19	1,27	9,39	3,72	123,24	29,24	6,87	7,99	6,84	4,73	3,76	2,78	3,28	0,63	0,4	2,61	224,94	378	1173,5
14	19,83	1,3	1,66	3,93	133,59	15,84	14,81	6,91	9,95	4,12	4,5	4,33	0,71	0,41	0,31	2,41	224,61	308	1177,8
15	11,92	1,49	9,29	13,28	126,63	15,24	16,28	4,9	6,3	6,41	4,09	4,88	1,5	0,5	0,71	2,35	225,77	371	1181,5
16	11,09	1,12	11,15	4,32	139,53	12,43	16,56	4,12	5,79	5,01	7,42	3,19	0,67	0,47	0,24	2,25	225,36	277	1173,6
17	17,94	1,32	1,64	3,44	138,6	15,99	18,2	5,68	3,41	3,97	10,03	1,47	0,62	0,49	0,26	2,19	225,25	257	1175,8
18	17,38	1,69	2,08	8,92	129,19	13,32	11,48	13,86	5,36	11,24	5,08	1,43	0,89	0,68	0,35	1,82	224,77	317	1183,2
19	14,04	2,01	6,67	26,64	113	5,8	18,24	9,99	6,53	8,43	5,02	2,54	1,41	0,85	1,95	2,52	225,64	463	1178,6
20	14,74	1,29	12,82	6,65	130,61	11,12	13,98	6,04	6,74	6,86	4,95	2,68	3,57	0,85	0,44	2,43	225,77	432	1174
21	11,45	1,16	1,4	29,54	122,3	11,21	13,61	6,63	6,48	7,01	5,11	2,82	3,32	0,72	0,35	2,42	225,53	427	1177,5
22	10,86	1,26	13,63	6,04	138,45	7,81	13,76	7,17	6,05	6,17	4,72	4,59	1,45	0,85	0,46	2,3	225,57	357	1173,9
23	18,7	1,46	1,89	13,09	124,42	18,36	12,37	7,15	6,48	6,85	5,21	4,78	1,23	0,76	0,43	2,32	225,5	419	1180,2
24	17,83	1,66	4,97	9,35	128,72	10,09	16,63	8,36	6,3	7,53	7,58	2,04	1,09	1,05	0,53	1,96	225,69	386	1178,8
25	14,2	1,88	13,07	27,96	97,56	15,63	7,11	8,31	12,52	9,53	7,16	4,68	1,63	0,89	0,81	3,24	226,18	595	1192,9
26	16,99	1,66	16,56	4,77	121,7	6,27	8,93	15,94	8,26	8,95	5,49	2,86	1,45	1,23	0,93	2,97	224,96	530	1183,5
27	13,13	1,92	2,43	45,23	92,96	14,01	7,54	10,71	10,34	9,87	8,02	3,46	1,65	1,07	0,61	3,17	226,12	588	1192,1
28	10,98	3,43	17,46	13,92	116,32	6,84	8,24	15,4	8,37	8,47	6,45	3,15	1,42	1,1	1,04	2,71	225,3	544	1184,7
29	21,14	2,24	8,2	17,31	100,03	20,48	8,41	8,78	10,13	9,94	8,43	3,76	1,61	1,22	0,69	2,97	225,34	589	1195,6
30	20,66	2,64	8,24	17,12	104,24	11,07	13,96	7,98	13	9,99	6,4	3,48	2,07	1,17	0,76	2,74	225,52	567	1193

Таблица 2. Расчетные режимы работы тепловоза 2ТЭ25К^М с составом из порожних вагонов массой 1500 т по участку 1-й категории сложности при соблюдении минимально возможного времени хода

№ варианта режима ведения поезда	Время работы на позициях контроллера машиниста, мин															Число прямых переключений	Расход топлива, кг		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15	
1	18,1	2,06	4,64	7,06	16,64	16,75	29,7	49,87	11,47	8,78	15,06	4,66	1,8	2,73	0,56	3,53	193,41	315	1349
2	16,6	2,63	2,76	3,5	18,6	14,21	36,38	42,77	14,18	15,62	15,2	2,38	2,38	1,06	1,91	2,64	192,37	289	1363,1
3	15,47	1,98	2,6	5,2	14,34	16,13	40,37	56,32	6,63	7,98	16,52	1,21	3,33	1,79	0,55	2,35	192,77	273	1370,7
4	15,34	1,86	2,68	3,37	7,72	23,98	49,7	48,93	8,15	8,55	13,14	2,07	3,77	0,54	0,6	2,3	192,2	261	1375,5
5	15,61	1,99	2,69	3,08	5,89	22,82	48,75	50,23	15,28	10,34	8,42	1,59	3,23	0,82	0,25	2,25	193,24	248	1378,8
6	14,61	1,84	2,87	3,61	4,2	6,35	67,43	59,74	6,93	13,48	5,64	2,58	0,68	0,3	0,25	2,25	192,76	226	1386,4
7	17,8	2,21	4,73	7,89	17,71	26,9	95,56	7,85	1,48	5,58	5,53	0,78	1,9	2,17	1,75	2,29	202,13	234	1303,0
8	17,98	1,93	2,59	3,35	9,71	35,74	105,06	2,17	2,27	5,08	6,64	5,78	0,37	0,25	0,24	2,41	198,3	217	1331,1
9	15,85	2,08	2,62	5,32	9,69	44,46	73	23,7	4,25	10,31	1,24	5,11	0,38	0,3	0,26	2,35	200,92	209	1336,3
10	14,79	3,9	2,6	3,28	8,97	52,77	92,92	3,39	2,6	3,21	8,33	2,82	0,4	0,48	0,29	2,25	203	207	1329,2
11	14,13	1,79	2,64	6,24	10,5	52,22	87,07	6,41	5,78	6,97	2,56	2,84	0,79	0,48	0,13	2,2	202,75	199	1326,5
12	14,84	2,2	2,74	2,82	7,52	30,57	115,08	13,79	1,35	2,36	4,74	0,53	0,14	0,13	0,12	2,2	201,13	189	1338,4
13	15,5	1,11	8,68	3,94	30,47	119,1	11,58	11,1	0,73	0,7	4,59	3,67	0,1	0,13	0,12	2,24	213,81	95	1251,7
14	17,68	1,16	1,32	9,93	51,86	98,19	12	11,09	0,69	0,94	5,53	3,4	0,14	0,14	0,13	2,36	216,56	113	1234,9
15	12,04	4,09	1,38	7,36	56,75	97,99	15,53	10,74	0,56	1,06	5,14	0,36	0,14	0,14	0,13	2,3	215,71	106	1234,2
16	13,89	1,24	2,82	5,39	44,51	97,99	27,82	8,34	0,82	7,02	1,12	1,3	0,15	0,14	0,13	2,25	214,93	110	1255,6
17	13,86	3,18	1,82	5,45	36,89	104,44	27,89	5,24	10,27	1,07	0,76	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	213,64	128	1259,9
18	12,13	1,32	1,46	9,14	37,02	126,64	8,09	15,35	0,83	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	215,13	146	1254,1
19	21,41	0,28	3,54	18,22	154,82	5,25	0,74	25,78	0,3	0,28	2,16	0,13	0,15	0,13	0,12	2,24	235,55	36	1106,2
20	24,55	0,8	0,86	14,98	138,43	35,33	0,78	14,82	0,35	0,72	1,35	0,13	0,14	0,13	0,13	2,36	235,86	39	1117,9
21	13,43	2,06	9,25	19,27	140,03	30,64	16,39	0,61	2,06	0,16	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	2,3	236,88	30	1114,5
22	13,41	1,8	10,12	15,21	142,99	31,01	16,25	2,35	0,18	0,16	0,14	0,13	0,15	0,14	0,13	2,25	236,42	28	1116,9
23	16,46	0,67	9,06	15,4	135,37	53,94	0,76	2,06	0,18	0,2	0,17	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	237,04	29	1110,3
24	13,38	4,28	0,88	21,61	168,65	19,15	8	0,21	0,21	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	239,53	24	1084,7
25	20,71	0,65	11,2	39,58	137,52	2,43	16,62	10,73	3,28	0,16	0,14	0,13	0,15	0,13	0,12	2,24	245,79	32	1083,3
26	29,29	0,91	5,41	32,86	117,87	6,98	44,15	0,3	0,3	0,29	2,03	0,13	0,14	0,13	0,13	2,36	243,28	39	1108,2
27	16,42	1,99	1,37	61,65	108,7	32,64	16,47	3,31	0,18	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	2,3	245,86	27	1100,4
28	15,62	0,6	15,48	32,41	122,78	32,78	16,51	3,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,15	0,14	0,13	2,25	242,67	28	1104,9
29	23,02	1,03	7,39	36,08	114,58	39,08	16,57	3,16	0,18	0,2	0,17	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	244,23	30	1106,4
30	21,55	1,46	6,39	37,1	114,41	33,23	22,72	2,76	0,21	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	242,99	30	1111,2

промежуточных станциях или при движении по желтому сигналу светофора. Небольшие отклонения от графика движения принято компенсировать наличием определенного допуска на время хода поезда по участку.

При серьезных нарушениях графика движения локомотивная бригада обязана осуществить введение поезда в график («нагон») для выдержки времени хода поезда без учета вопросов энергоэффективности.

Из-за необходимости наличия значительных вычислительных средств в микропроцессорной системе управления тепловозом невозможно после нарушения графика движения просчитать в реальном режиме времени новый график движения на весь оставшийся участок, но возможно рассчитать график движения на более коротких перегонах (субучастках), состоящих из нескольких блок-участков.

Согласно принципу оптимальности Р. Беллмана [7, 8], независимо от того, каким бы путем система ни пришла в данное состояние, дальнейшее ее движение должно быть оптимальным. При реализации этого принципа алгоритм управления должен после фиксации нарушения энергооптимального режима перейти на расчет нового энергооптимального режима на самостоятельно выбранном по длине субучастке с выдачей команд управления в режиме реального времени. Время прохождения таких субучастков будет значительно меньше, следовательно, и вероятность отклонения от заданного режима должна быть менее существенна.

Повторный расчет для оставшихся перегонов потребует меньших вычислений благодаря уменьшению оставшегося времени хода и расстояния, что позволяет выполнить его в масштабе реального времени и получить для каждого из субучастков режим, близкий к энергооптимальному.

Практически необходимо проверить возможность выполнения для данного случая хорошо

известного алгоритма оптимизации процесса — киевский веник [8–10], формулирующий правила последовательного усечения множества конкурентоспособных вариантов. Алгоритм выбора режимов ведения представляет собой многошаговый процесс, на каждом этапе которого выполняется отбрасывание некоторого множества вариантов, о которых становится известно, что они не являются оптимальными.

В данном случае на каждом субучастке может быть выбрана самая экономичная комбинация режимов из нескольких ранее рассчитанных. Показатели движения в конце субучастка становятся исходными для всех рассматриваемых вариантов движения следующему субучастку. Итогом проверки на аддитивность является сравнение расходов топлива, полученных в результате тягово-энергетического расчета по всему железнодорожному участку с суммой расходов топлива, определенной по энергооптимальным режимам по каждому субучастку.

По существующей классификации продольных профилей железнодорожной сети различают 4 типа профиля. При этом каждой группе профилей соответствует доля так называемых легких элементов профиля с уклонами от минус 3 ‰ до плюс 3 ‰ и значения расчетных подъемов [11].

В данной работе для примера выбраны 4 реальных железнодорожных участка разной категории сложности, разбитые на 5–8 субучастков. На каждом субучастке была определена комбинация режимов ведения с наименьшим расходом топлива, по тому же алгоритму, что и для всего участка. Исходными данными (скорость движения, позиция контроллера) для следующего субучастка являются результаты расчета в конце предыдущего субучастка.

Результаты вычислений приведены в табл. 3–6. Числитель в таблицах соответствует значениям,

Таблица 3. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 1-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения субучастков, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастках, МДж	Скорость движения в конце субучастков, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
0–66 900	59,6/59,6	5788,4/5788,4	893,0/893,0	34,6/34,6	464,5/464,5
66 900–95 900	25,9/26,2	2290,0/2351,2	593,3/636,0	34,6/34,6	185,3/189,6
95 900–129 900	30,8/30,4	2964,2/2966,8	549,6/513,3	34,8/34,9	241,0/246,3
129 900–178 000	42,1/42,2	3432,9/3449,3	1072,8/1119,2	34,9/34,9	282,9/283,8
178 000–220 800	43,6/43,2	3551,3/3383,1	1113,4/924,9	0/0	284,9/271,8
Итого	202/201,6	18026,8/17938,8	4222,1/4086,4		1458,6/1455,6
Процент расхождения, %	0,2	0,5	3,3		0,2

Таблица 4. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 2-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения субучастков, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастках, МДж	Скорость движения в конце субучастков, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
1 859 950–1 918 000	70,1/70,1	1113,6/1113,6	8304,2/8304,2	35,0/35,0	121/121
1 918 000–1 992 000	80,3/80,4	5359,0/5522,9	1641,1/1903,9	33,1/33,7	442,5/453,6
1 992 000–2 058 000	73,9/73,8	7059,2/6869,4	1758,3/1541,3	32,8/32,8	545,0/533,9
2 058 000–2 121 000	69,6/69,9	6647,1/6844,4	1184,9/1390,6	34,8/34,8	515,5/528,7
2 121 000–2 186 000	73,0/73,8	6691,4/6726,4	1440,3/1404,9	34,8/34,8	519,0/522,5
2 186 000–2 241 000	63,6/64,1	8904,9/8916,9	1178,5/1217,7	36,8/36,8	665,6/666,4
2 241 000–2 290 000	57,2/58,5	7592,4/7700,1	2257,7/2425,3	32,7/32,9	567,8/576,2
2 290 000–2 342 700	64,8/64,7	2201,9/2253,5	7584,6/7634,9	0/0	190,8/194,5
Итого	552,5/555,3	45569,5/45647,2	25349,6/25822,8		3567,2/3596,8
Процент расхождения, %	0,5	0,2	1,8		0,8

полученным при расчете энергооптимального режима по субучасткам, знаменатель — значениям, полученным при расчете по всему участку, без разбиения его на субучастки.

Из результатов вычисления следует, что погрешность в комбинации энергооптимальных режимов по расходу энергоресурсов составляет не более 2 %. На более легких участках профиля

Таблица 5. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 3-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения границы субучастка, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастке, МДж	Скорость движения в конце субучастка, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
0–262 290	39,62/41,22	5304,19/5242,18	2355,41/2375,15	35,16/33,17	399,95/394,98
262290–309 800	43,31/44,36	5986,31/5742,0	3394,93/3280,37	34,43/34,37	432,48/430,5
309 800–352 590	48,51/49,83	7500,30/7837,57	1677,76/2060,64	33,16/33,16	551,98/577,52
352 590–394 740	41,03/40,61	5628,99/5734,75	2315,07/2409,1	35,08/35,20	421,28/427,8
394 740–423 500	28,96/29,76	2502,91/2619,7	4083,97/4196,01	0/0	190,66/199,4
Итого	201,48/205,78	26922,7/27176,2	13827,14/14321,27		1996,35/2030,2
Процент расхождения, %	2,09	0,93	3,45		1,66

Таблица 6. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 4-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения границы субучастка, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастке, МДж	Скорость движения в конце субучастка, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
404 990–380 310	35,06/34,75	3553,96/3445,4	0/0	36,1/35,08	268,3/275,39
380 310–353 320	30,9/31,39	3600,9/3677,8	396,0/461,5	35,4/35,33	273,4/279,2
353 320–317 330	41,89/40,18	5843,02/5944,04	271,71/299,11	38,38/37,98	437,73/446,89
317 330–288 310	38,35/37,59	6689,56/6723,63	0/0	33,67/33,68	491,93/494,91
288 310–254 310	44,16/43,0	8949,82/8910,5	0 0	33,11/33,17	645,87/646,08
254 310–234 900	31,73/31,63	6767,7/6791,67	0/37,12	0/0	491,1/493,38
Итого	222,09/218,54	35404,9/35492,59	667,71/797,73		2334,93/2635,85
Процент расхождения, %	1,6	0,2	16,3		1,3

погрешность в определении комбинации энергооптимального режима меньше, чем на более тяжелых.

Подтвержденный таким образом аддитивный процесс для расчета энергооптимального режима

поезда с применением программы «Тяга — Прогноз» позволяет распространить алгоритмы поиска энергооптимальных режимов ведения поезда, реализованных в программе «Тяга — Прогноз» на системы автоведения.

Вместе с тем очевидно, для выполнения вычисления энергооптимального режима в реальном масштабе времени потребуются разбиение железнодорожного участка на большее число субучастков. Вопросы о том, насколько сохранится оптимальным процесс поиска при дроблении перегона на более мелкие субучастки, каков будет характер погрешности поиска энергооптимальных режимов ведения и каково влияние изменения разбиения на субучастки на энергооптимальность, требуют дальнейших исследований.

Одним из путей уменьшения объема вычислений является уменьшение числа комбинаций рассматриваемых режимов управления. Если из табл. 1 выбрать каждый третий режим, то результат при выборке из 10 режимов ухудшился на 1,7 %, а если каждый пятый, то результат при выборке из 6 режимов ухудшился на 1,8 %. Целесообразность такого подхода к сокращению объема вычислений может считаться достаточно перспективной.

В силу влияния на результат поиска большого числа факторов установить общие правила назначения количества вариантов поиска в выборке с целью получения наилучшего результата получения энергооптимального режима достаточно сложно. Данный вопрос должен решаться для каждого железнодорожного участка и массы поезда индивидуально.

Выводы

Подтверждена аддитивность энергооптимального режима ведения поезда тепловозом, определенного с помощью алгоритмов, реализованных в программном комплексе «Тяга — Прогноз», что позволяет использовать данные алгоритмы в программах автоведения поезда тепловоза.

Список источников

1. Фаминский Г. В. Автоматические устройства для вождения поездов / Г. В. Фаминский, Е. В. Ерофеев. — М.: Транспорт, 1978 — 108 с.

2. URL: <https://zdmira.com/news/v-kitae-uspeshno-ispitali-bespilotnyj-tyazhelovesnyj-poezd>.

3. Гриневич В. П. Использование программного комплекса «Тяга — Прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 131–149. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022616927 Российская Федерация. Программа выполнения тягово-энергетических расчетов «Тяга — Прогноз» ведения локомотивами поездов различной составности по энергооптимальным режимам / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич и др. — № 2022616055; заявл. 06.04.2022; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 4.

5. Гриневич В. П. К вопросу оценки переходных процессов в тепловозном дизель-генераторе / В. П. Гриневич, Т. С. Авсиевич, П. С. Фролов // Вестник ВНИКТИ. — 2022. — Вып. 105. — С. 53–60.

6. Курилкин Д. Н. Учет переходных процессов в дизель-генераторной установке тепловоза при выполнении тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1. — С. 22–34. — DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_22.

7. Беллман Р. Динамическое программирование / Беллман Р. Пер. с англ. И. М. Андреевой и др.; под общ. ред. Н. Н. Воробьева. — М.: Издательство иностранной литературы, 1960. — 400 с.

8. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука. 1971. — 424 с.

9. Костромин А. М. Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. — М.: Транспорт, 1979. — 119 с.

10. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.

11. Баранов А. М. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий / А. М. Баранов, В. Е. Козлов, Э. Д. Фельдман // Труды ВНИИЖТ. — М.: Транспорт, 1964. — Вып. 280. — 196 с.

Дата поступления: 20.12.2024

Решение о публикации: 02.02.2025

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — заместитель главного инженера по перспективным проектам — заведующий НИ КБ ЭМСУ АО «ВНИКТИ»; info@vnikti.com

АВСИЕВИЧ Татьяна Сергеевна — инженер I категории АО «ВНИКТИ»; avsievich-ts@vnikti.com

ГРИНЕВИЧ Владимир Петрович — эксперт I категории АО «ВНИКТИ»; grinevich-vp@vnikti.com

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; kurilkin@pgups.ru

Using Algorithms of the Traction–Forecast Software Package to Develop Energy–Efficient Train Driving Modes

S. N. Zhuravlev¹, T. S. Avsievich¹, V. P. Grinevich¹, D. N. Kurilkin²

¹Scientific-Research and Constructive-Technology Institute of Rolling Stock (JSC “VNIKTI”), 410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Zhuravlev S. N., Avsievich T. S., Grinevich V. P., Kurilkin D. N. Using Algorithms of the Traction-Forecast Software Package to Develop Energy-Efficient Train Driving Modes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 148–159. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-148-159

Summary

Purpose: Fuel saving is one of the key challenges facing railway transport. The “Traction — Forecast” software is a solution in search for energy-efficient modes of train driving in various operating conditions. It is difficult to use the algorithms of the system in automatic train operation programmes because of the need to perform a large amount of calculations in real time. The application of energy-saving train driving methods that have been determined by the “Traction — Forecast” software algorithms has been increasingly important due to the necessity of improving locomotive operations. The additivity of the determined modes makes it possible to apply the “Kiev broom” algorithm for solving traction-energy problems using the “Traction — Forecast” software, which sharply reduces the number of steps performed when determining the energy-efficient mode. The solutions for reducing the computational volume of the train-driving mode without noticeable fuel losses have been proposed. **Methods:** The values of the train fuel consumption determined for the whole railway line energy-efficient mode have been compared with the fuel consumption for separate sections of the same railway line calculated according to the same guidelines. **Results:** The additivity of energy-optimal modes of train driving determined by the “Traction — Forecast” software algorithms for a single railway line and its separate sections with an error of less than 2% has been confirmed. **Application:** The algorithms of the “Traction — Forecast” software can be applied in the automatic train operation programmes.

Keywords: Software system, traction calculations, optimal control, energy-optimal mode, additivity, terminology.

References

1. Faminskiy G. V., Erofeev E. V. *Avtomaticheskie ustroystva dlya vozhdeniya poezdov* [Automatic devices for driving trains]. Moscow: Transport Publ., 1978, 108 p. (In Russian)
2. Available at: <https://zdmira.com/news/v-kitae-uspeshno-ispytali-bespilotnyj-tyazhelovesnyj-poezd>. (In Russian)
3. Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsievich T. S. Ispol'zovanie programmnoy kompleksa "Tyaga — Prognoz" dlya poiska energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda [Using the Tyaga — Prognoz software package to search for energy-optimal train driving modes]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2022, Iss. 4, pp. 131–149. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149. (In Russian)
4. Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsievich T. S. et al. *Programma vypolneniya tyagovo-energeticheskikh raschetov "Tyaga — Prognoz" vedeniya lokomotivami poezdov razlichnoy sostavnosti po energooptimal'nykh rezhimam* [Program for performing traction and energy calculations "Tyaga — Prognoz" for locomotive operation of trains of various compositions in energy-optimal modes]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RF, no. 2022616927, 2022. (In Russian)
5. Grinevich V. P., Avsievich T. S., Frolov P. S. K voprosu otsenki perekhodnykh protsessov v teplovoznom dizel'-generatore [On the issue of assessing transient processes in a locomotive diesel generator]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2022, Iss. 105, pp. 53–60. (In Russian)
6. Kurilkin D. N., Grachev V. V., Bragin A. G. Uchet perekhodnykh protsessov v dizel'-generatornoy ustanovke teplovoza pri vypolnenii tyagovykh raschetov [Accounting for transient processes in a diesel generator set of a locomotive when performing traction calculations]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1, pp. 22–34. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_22. (In Russian)
7. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye. Per. s angl. I. M. Andreevoy i dr.; pod obshch. red. N. N. Vorob'eva* [Dynamic programming. Transl. from English by I. M. Andreeva et al.; under the general editorship of N. N. Vorobyov]. Moscow: Izdatel'stvo inostranoy literatury Publ., 1960, 400 p. (In Russian)
8. Moiseev N. N. *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem* [Numerical methods in the theory of optimal systems]. Moscow: Nauka Publ., 1971, 424 p. (In Russian)
9. Kostromin A. M. *Optimizatsiya upravleniya lokomotivom* [Optimization of locomotive control]. Moscow: Transport Publ., 1979, 119 p. (In Russian)
10. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem* [Energy-optimal methods of traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012, 80 p. (In Russian)
11. Baranov A. M., Kozlov V. E., Fel'dman E. D. Razvitie propusknoy i provoznoy sposobnosti odnopusnykh liniy [Development of throughput and carrying capacity of single-track lines]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT]. Moscow: Transport Publ., 1964, Iss. 280, 196 p. (In Russian)

Received: December 20, 2024

Accepted: February 02, 2025

Author's information:

Sergey N. ZHURAVLEV — Deputy Chief Engineer for Advanced Projects — Head of the Research Institute of the EMSU Design Bureau of VNIKTI JSC; info@vnikti.com
Tatiana S. AVSIEVICH — Engineer of the First Category of JSC VNIKTI; avsievich-ts@vnikti.com
Vladimir P. GRINEVICH — Expert of the First Category of JSC VNIKTI; grinevich-vp@vnikti.com
Dmitry N. KURILKIN — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Locomotives and Locomotive Engineering; kurilkin@pgups.ru

УДК 656.256

О компенсации помехи, возникающей из-за асимметрии в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене

Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

Для цитирования: Рядчиков Р. О., Кузьмин В. С. О компенсации помехи, возникающей из-за асимметрии в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 160–170. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-160-170

Аннотация

Цель: Сбои в работе поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене приводят к подтормаживаниям и остановкам в тоннелях, вследствие чего нарушается график движения поездов. Наиболее частой причиной возникновения таких сбоев являются помехи, действующие в канале индуктивной связи между напольной аппаратурой и поездными устройствами. В статье сформулировано условие компенсации для разработанного ранее приемного устройства, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации, обусловленную геометрическим положением контактного рельса. **Методы:** На основе сформулированного в ранее опубликованной работе в общем виде условия компенсации помехи в канале индуктивной связи с асимметрией геометрического положения приемных катушек и контактного рельса, на основе закона Био — Савара — Лапласа получено новое выражение, учитывающее включение дополнительных приемных катушек, индуктивно связанных с контактным рельсом. **Результаты:** Предложено математическое обеспечение, включающее в себя расчетное выражение, определяющее условие компенсации помехи. Был получен ряд характерных зависимостей для коэффициента пропорциональности, используемого для настройки параметров работы устройства компенсации помехи, и ЭДС, наведенных в основной и дополнительной приемных катушках системы автоматической локомотивной сигнализации при изменении геометрических параметров их размещения. **Практическая значимость:** Результаты моделирования позволяют определить величину коэффициента пропорциональности, характеризующего различие геометрического положения основных и дополнительных приемных катушек. Значение этого коэффициента для заданного геометрического положения катушек является основой для настройки работы предложенного устройства в условиях депо.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, асимметрия, метрополитен, устройства безопасности, контактный рельс, индуктивный канал связи, автоматическая локомотивная сигнализация с автоматическим регулированием скорости.

Введение

В основе функционирования систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитенах (далее — АТДП) лежит непрерывная передача информации о допустимой и преду-

редительной скоростях движения от путевых устройств к поездным с использованием индуктивного канала передачи информации системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости. В слу-

чаях неполучения бортовой аппаратурой такой информации в течение установленного интервала времени или получения ею приказа разрешения на движение с меньшей допустимой скоростью движения применяется автоматическое торможение, что в условиях достаточно плотного графика движения поездов и отсутствия резервов по времени может приводить к существенным задержкам и остановкам в тоннелях.

В работе поездных устройств АТДП в последнее время наблюдается резкое увеличение числа сбоев, в том числе случаев срабатывания числовой (по количеству принимаемых частот) защиты [1]. Причиной возникновения сбоев в работе АТДП могут быть как отклонения собственных параметров бортовой аппаратуры (что наблюдается достаточно редко в связи с переходом на микропроцессорные устройства обработки сигналов), так и мешающее действие электромагнитной помехи, присутствующей в канале индуктивной связи. Причем последняя может возникать из-за достаточно обширного перечня причин, например ввиду асимметрии тягового тока в рельсовых нитях [2, 3], действия внешних электромагнитных полей от силового оборудования, в частности от асинхронных тяговых двигателей [4, 5] или же асимметрии, возникающей в канале индуктивной связи из-за геометрического положения контактного рельса [6].

В ранее опубликованных теоретических и экспериментальных работах, связанных с анализом электромагнитной обстановки в условиях метрополитенов, в частности [7–10], вопрос формирования требований к методам и техническим решениям для компенсации помехи, возникающей на входе приемника поездных устройств АТДП из-за асимметрии в канале индуктивной связи и влияния внешних электромагнитных полей, практически не обсуждался. В то же время авторами ранее было предложено техническое решение, обеспечивающее компенсацию помехи, связанной с

асимметрией в канале индуктивной связи метрополитенов за счет применения дополнительной компенсационной катушки автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости [11]. Условие компенсации, сформулированное авторами ранее в [6], требует дополнительной адаптации для решения, описанного в [11]. С учетом этого целью настоящей работы выбрана разработка математического обеспечения для разработанного ранее устройства компенсации электромагнитной помехи в канале индуктивной связи, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи, обусловленную геометрическим положением контактного рельса.

Материалы и методы

Предложенное ранее авторами устройство компенсации помехи в канале индуктивной связи на метрополитене, приведенное в [11], описывается с использованием структурной схемы (рис. 1). Особенность данного технического решения — использование дополнительных приемных катушек 1 и 2 системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости, индуктивно связанных с полем, формируемым тяговым током, протекающим в контактном рельсе.

При возникновении асимметрии ЭДС, наводимых в ходовых приемных катушках 1 и 2 из-за изменения их геометрического положения относительно уровня головок ходовых рельсов и, соответственно, оси контактного рельса, изменяется и характер индуктивной связи той дополнительной приемной катушки 1 или 2, которая находится в данный момент напротив контактного рельса КР. Блок вычисления непрерывно анализирует наводимые в ходовых и дополнительных приемных катушках ЭДС и на основе результатов такого анализа управляет работой сумматора, который, в свою очередь, вычитает с учетом поправочных коэффициентов из смеси сигнала и помехи

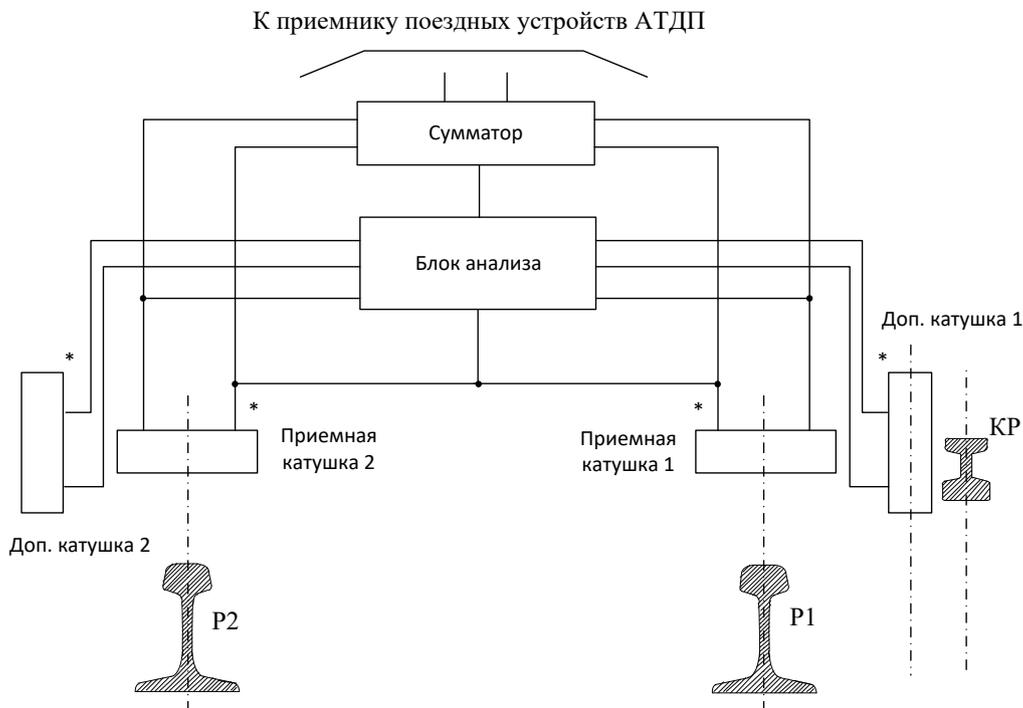


Рис. 1. Структурная схема устройства компенсации помехи от тягового тока на входе приемника поездных устройств АТДП

(суммы сигналов), полученной от основных приемных катушек, сигнал компенсации, сформированный на выходе одной из дополнительных приемных катушек.

В основе математического обеспечения функционирования предложенного устройства лежит следующее условие компенсации помехи от контактного рельса КР (1):

$$E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}} - E_{\text{ком}_{\text{КР}}} = 0, \quad (1)$$

где $E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}}$ — действующее значение ЭДС, наводимой в приемной катушке ПК1 от тока, протекающего в контактном рельсе КР;

$E_{\text{ком}_{\text{КР}}}$ — действующее значение компенсирующей ЭДС, наведенной в дополнительных приемных катушках от контактного рельса КР.

С учетом взаимного расположения приемных катушек условие компенсации помехи может быть записано в виде (2):

$$E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}} - E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ДК1}} K_{\text{ПГ}} = 0, \quad (2)$$

где $K_{\text{ПГ}}$ — коэффициент пропорциональности, определяющий различие геометрического положения рассматриваемых приемных катушек; $E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ДК1}}$ — действующее значение ЭДС, наведенной в дополнительной приемной катушке от тока, протекающего в контактном рельсе КР.

Неизвестным для рассматриваемого в настоящей работе варианта выполнения устройства компенсации электромагнитной помехи в канале индуктивной связи является величина коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ пропорциональности, определяющего различие геометрического положения основной и дополнительной приемных катушек, поэтому далее определим зависимость $K_{\text{ПГ}}$ от геометрических параметров размещения приемных катушек на подвижном составе. Для основной и дополнительной приемных катушек величины,

наводимых в них током, протекающим в контактном рельсе, ЭДС имеют вид (3) и (4) соответственно:

$$E_{\text{помкр}}^{\text{ПК1}} = -\frac{\mu_0 \mu_{\text{ПК1}} S_{\text{ПК1}} N_{\text{В}}^{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}} I_{\text{КР}}}{2\pi l_{\text{ПК1}}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{помкр}}^{\text{ДК1}} = -\frac{\mu_0 \mu_{\text{ДК1}} S_{\text{ДК1}} N_{\text{В}}^{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}} I_{\text{КР}}}{2\pi l_{\text{ДК1}}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{КР}}$ — действующее значение силы тока, протекающего в контактном рельсе КР;
 $\mu_{\text{ПК1}}$ и $\mu_{\text{ДК1}}$ — магнитная проницаемость материала сердечников приемной и дополнительной приемных катушек соответственно;
 $S_{\text{ПК1}}$ и $S_{\text{ДК1}}$ — площадь поперечного сечения сердечников приемной и дополнительной приемных катушек соответственно;
 $N_{\text{А}}^{\text{ПК1}}$ и $N_{\text{В}}^{\text{ДК1}}$ — количество витков основной и дополнительной приемных катушек соответственно;
 $\alpha_{\text{ПК1}}$ — угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью приемной катушки ПК1;
 $\alpha_{\text{ДК1}}$ — угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью дополнительной катушки ДК1;
 $l_{\text{ПК1}}$ и $l_{\text{ДК1}}$ — расстояния от центра силовых магнитных линий, формируемых током, протекающим в контактном рельсе, до центра приемной и дополнительной катушек соответственно.

С учетом (2), (3) и (4) значение коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ имеет вид (5):

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{l_{\text{ДК1}} \mu_{\text{ПК1}} S_{\text{ПК1}} N_{\text{В}}^{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}}}{l_{\text{ПК1}} \mu_{\text{ДК1}} S_{\text{ДК1}} N_{\text{В}}^{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}}}. \quad (5)$$

Значение коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ для случая, когда основная и дополнительная приемные катушки имеют одинаковые параметры, имеет вид (6):

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{l_{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}}}{l_{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}}}. \quad (6)$$

Для определения косинусов углов, присутствующих в формулах (5) и (6), далее необходимо описать характер индуктивной связи основной и дополнительной приемных катушек с током, протекающим в контактном рельсе. Для этого рассмотрим схему (рис. 2).

На рис. 2 использованы следующие обозначения:

$h_{\text{к}}$ — расстояния от уровня головки ходового рельса Р1 до центра силовых линий контактного рельса КР;
 Δh — расстояние между центрами основной приемной катушки ПК1 и дополнительной катушки ДК1 по вертикали;
 $\Delta h_{\text{к}}$ — расстояние от линии, параллельной уровню головки ходового рельса Р1 и проходящей через центр силовых магнитных линий контактного рельса КР, до центра приемной катушки ПК1 по вертикали;
 $l_{\text{р}}$ — расстояние от оси ходового рельса Р1 до оси контактного рельса КР по горизонтали;
 Δl — расстояние между центрами основной приемной катушки ПК1 и дополнительной катушки ДК1 по горизонтали;
 $\Delta l_{\text{к}}$ — смещение приемной катушки ПК1 от оси ходового рельса Р1 по горизонтали;
 $\vec{B}_{\text{КР}}^{\text{ПК1}}$ — вектор индукции магнитного поля, формируемой током, протекающим в контактном рельсе КР, для основной приемной катушки П;
 $\vec{B}_{\text{КР}}^{\text{ДК1}}$ — вектор индукции магнитного поля, формируемой током, протекающим в контактном рельсе КР, для дополнительной приемной катушки ДК1.
С учетом особенностей, показанных на рис. 2, косинусы углов $\alpha_{\text{ПК1}}$ и $\alpha_{\text{ДК1}}$ могут быть получены с использованием выражений (7) и (8) соответственно:

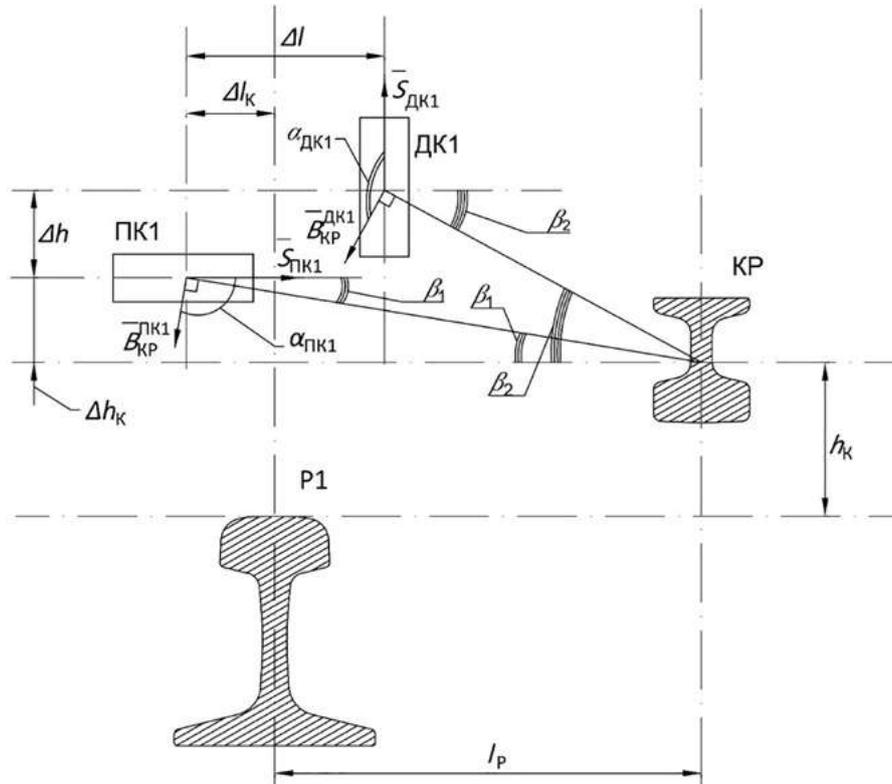


Рис. 2. Взаимное расположение контактного рельса, ближайшего к нему ходового рельса, основной и дополнительной приемных катушек

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{ПК1} &= \cos(90^\circ + \beta_1) = \\ &= -\sin \beta_1 = -\frac{\Delta h_K}{\sqrt{\Delta h_K^2 + (l_P + \Delta l_K)^2}}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{ДК1} &= \cos(180^\circ - \beta_2) = -\cos \beta_2 = \\ &= -\frac{l_P + \Delta l_K - \Delta l}{\sqrt{(\Delta h_K + \Delta h)^2 + (l_P + \Delta l_K - \Delta l)^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (6), (7) и (8) расчетное выражение для определения характера зависимости величины коэффициента $K_{ПГ}$ от геометрических параметров размещения основной и дополнительной катушек на подвижном составе имеет вид (9):

$$\begin{aligned} K_{ПГ} &= \frac{\Delta h_K}{l_P + \Delta l_K - \Delta l} \times \\ &\times \frac{(\Delta h_K + \Delta h)^2 + (l_P + \Delta l_K - \Delta l)^2}{\Delta h_K^2 + (l_P + \Delta l_K)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Рассмотрим случай, когда основная ПК1 и дополнительная ДК1 приемные катушки перемещаются в пространстве на одинаковые расстояния по вертикали Δh_K и по горизонтали Δl_K . Для данного случая графики зависимости величины коэффициента $K_{ПГ}$ при различных величинах расстояний между центрами приемных катушек ПК1 и ДК1 по вертикали Δh и по горизонтали Δl будут иметь следующий вид (рис. 3).

Представленные на рис. 3 значения $K_{ПГ}$ следует использовать для предварительной настройки сумматора предложенного устройства (рис. 1). Отметим, что значение коэффициента передачи $K_{ПГ}$ остается неизменным и равным нулю при любых боковых смещениях в системе катушек.

Для выбора оптимального расположения катушки ДК1 относительно основной катушки ПК1 рассмотрим графики изменения ЭДС $E_{помКР}^{ПК1}$

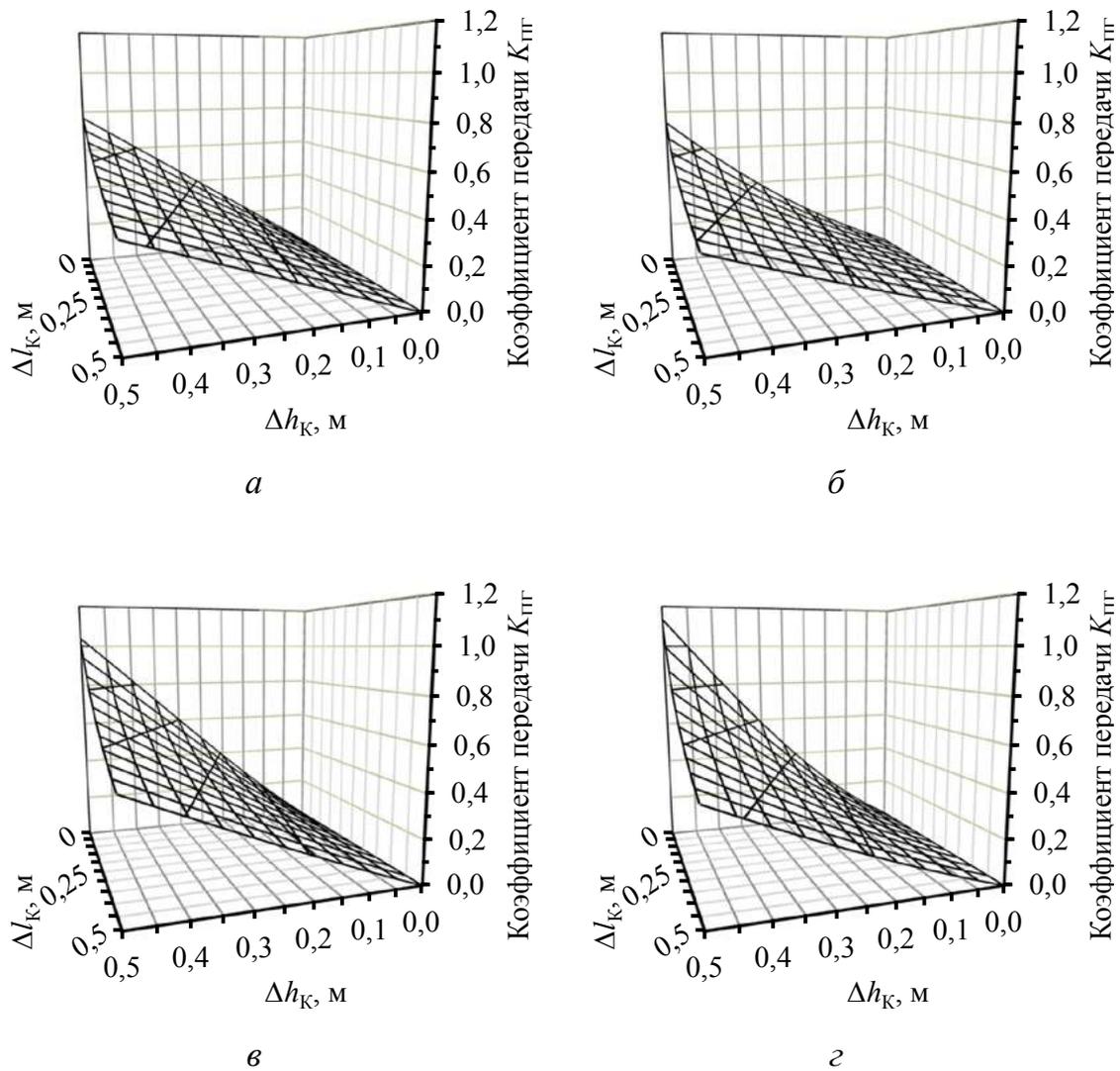


Рис. 3. Графики изменения коэффициента передачи $K_{пт}$ от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:

a — $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м; *б* — $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м;

в — $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м; *г* — $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м

и $E_{помкр}^{ДК1}$ при различных величинах расстояний между центрами приемных катушек П и ДК1 по вертикали Δh и по горизонтали Δl (рис. 4, 5).

При незначительных колебаниях высоты подвеса основной катушки действующее значение величины $E_{помкр}^{ПК1}$ может увеличиваться в 5 раз и более. Наибольшее действующее значение величины $E_{помкр}^{ДК1}$ достигается при размещении катушки ДК1 таким образом, что ее центр оказы-

вается смещенным от центра основной катушки ПК1 на некоторое значение Δl в горизонтальной плоскости (пример на рис. 5, б).

С учетом этого дополнительные приемные катушки ДК1 и ДК2 рекомендуется размещать таким образом, чтобы величина Δl была как можно больше, при этом корпус приемной катушки не выходил за пределы габарита подвижного состава. Это позволит обеспечить большой диа-

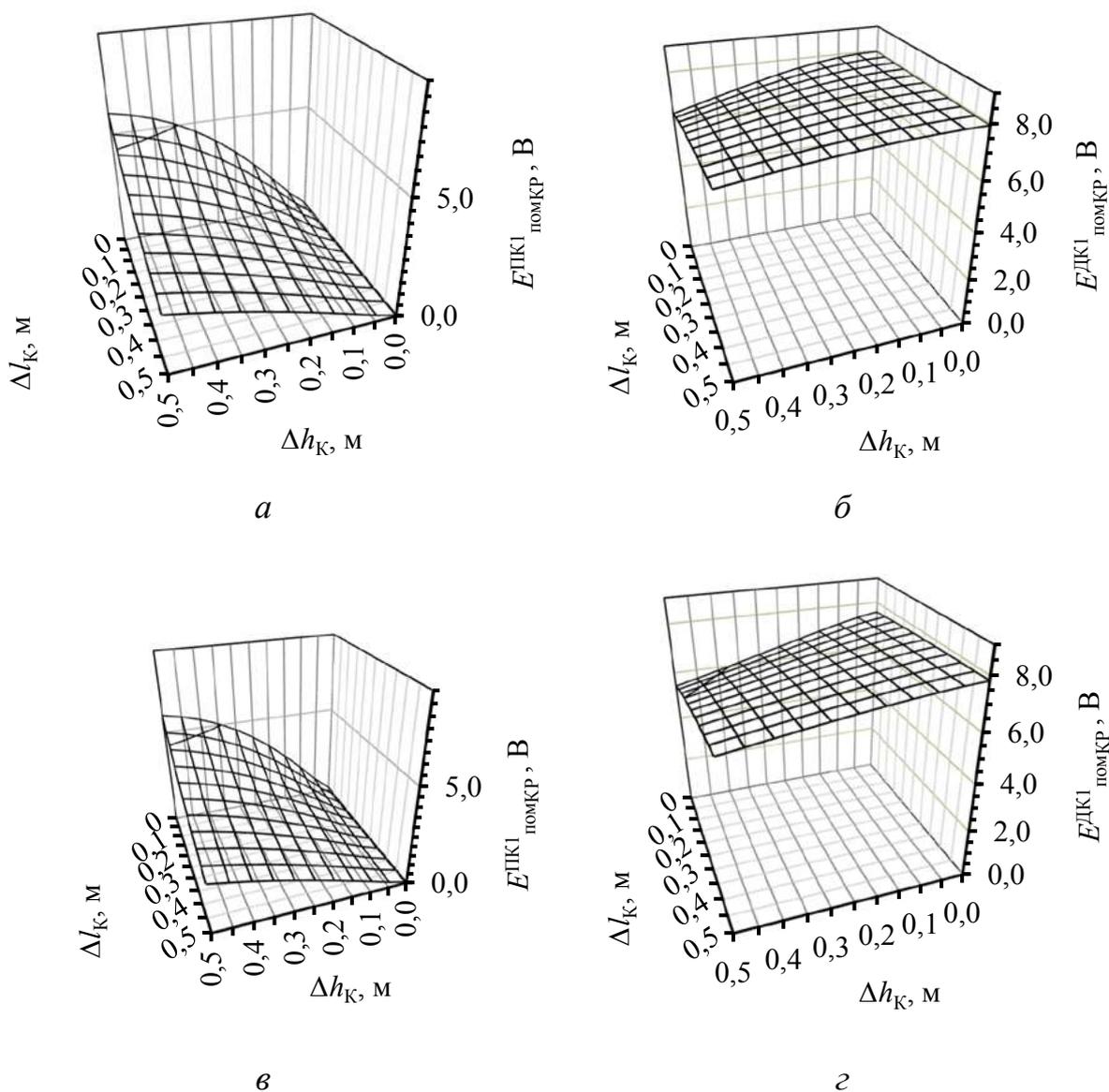


Рис. 4. Графики зависимости ЭДС в основной и дополнительной приемных катушках от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:

a — ПК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м; *б* — ДК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м;
в — ПК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м; *г* — ДК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м

пазон амплитуд компенсируемых помех. Величину Δh рекомендуется принимать равной нулю, чтобы исключить необходимость корректировки значения коэффициента КПП в процессе движения поезда (в пределах интервала времени между проведением технического обслуживания в объеме ТО-2).

Заключение

1. На основе рассмотрения научных исследований и разработок в области анализа влияния электромагнитной обстановки на работу бортового оборудования систем АТДП была установлена необходимость разработки спосо-

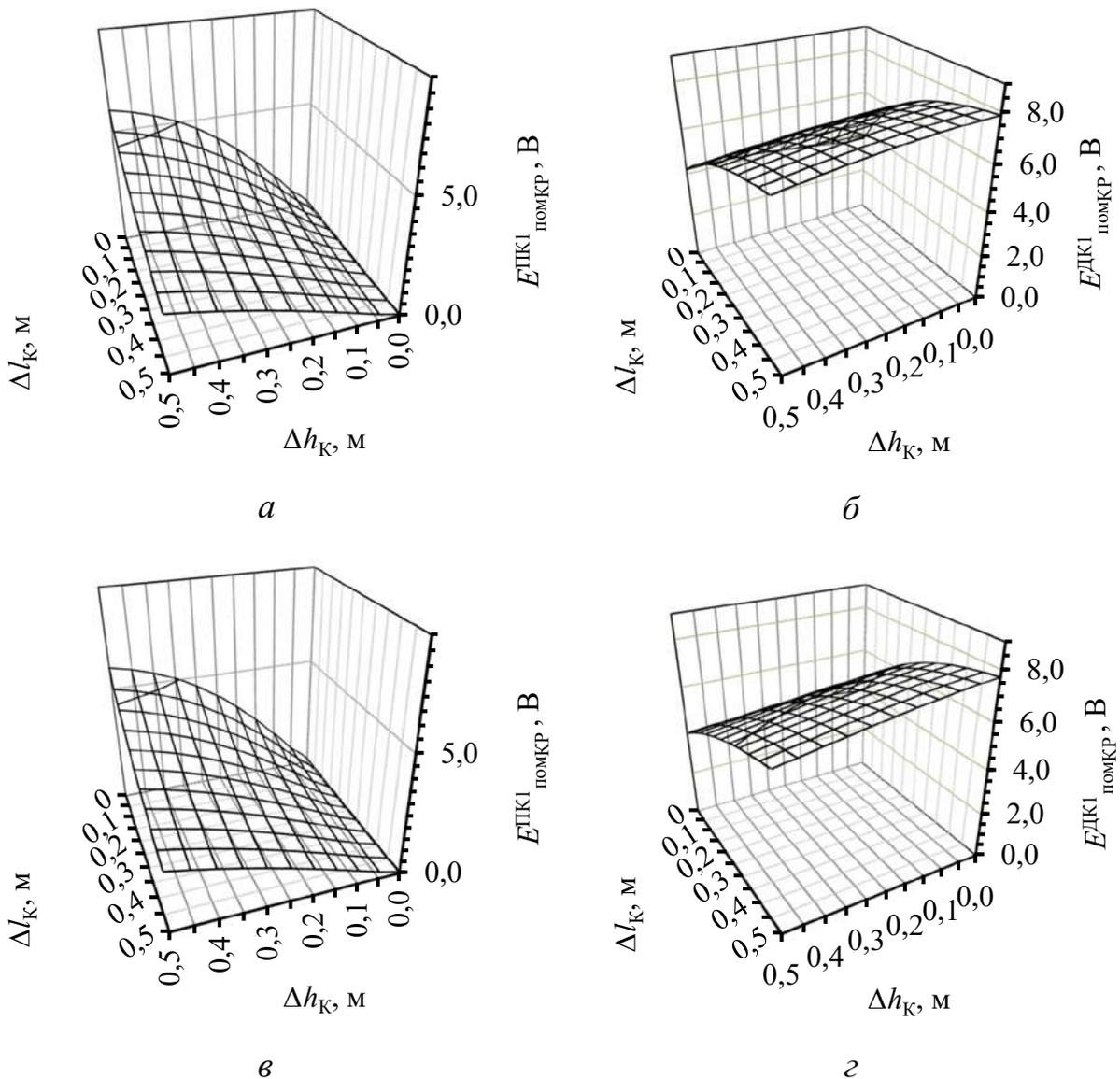


Рис. 5. Графики зависимости ЭДС в основной и дополнительной приемных катушках от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:
а — ПК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м; *б* — ДК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м;
в — ПК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м; *г* — ДК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м

бов снижения влияния помех в канале индуктивной связи системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости, вызванных асимметрией геометрического положения контактного рельса.

2. Разработано математическое обеспечение для разработанного ранее устройства компенсации электромагнитной помехи, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи, обусловленную геометрическим положением контактного рельса.

3. С помощью разработанного математического обеспечения был получен ряд характерных зависимостей, позволяющих обеспечить настройку параметров сумматора предложенного устройства компенсации помехи.

4. Определены рекомендуемые параметры размещения дополнительных катушек. Величину Δh рекомендуется принимать равной нулю, а величину Δl следует принимать максимально возможной с учетом габаритов используемой приемной катушки размещения основных приемных катушек и габарита подвижного состава.

Перспектива исследований в данной области заключается в формировании математической модели, учитывающей при компенсации помехи на входе поездных устройств АТДП величину асимметрии тяговых токов в рельсовой линии под приемными катушками.

Список источников

1. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. — М.: Транспорт, 1986. — 351 с.

2. Манаков А. Д. Асимметрия рельсовых цепей с реле ДСШ-2 / А. Д. Манаков, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — Т. 14. — № 2. — С. 280–297.

3. Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко и др. // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–40.

4. Pat. 5501416 (US). Method and apparatus for inductively receiving cab signaling on board a railway vehicle. Capan Ronald R. — 1996.

5. Pat. 5501417 (US). Noise cancellation in railway cab signal. Capan Ronald R. — 1996.

6. Кузьмин В. С. К вопросу о возникновении помех в канале индуктивной связи на метрополитене за счет асимметрии геометрического положения контактного

рельса / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, Р. О. Рядчиков // Наука и техника транспорта. — 2022. — № 4. — С. 8–16.

7. Баранов Л. А. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, Р. О. Рядчиков // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 2. — С. 8–13.

8. Кабецкий А. Г. Метод оценки влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на метрополитене / А. Г. Кабецкий // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей Международной научно-теоретической конференции, Санкт-Петербург, Петергоф, 18 мая 2021 года. — Санкт-Петербург, Петергоф: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений), 2021. — С. 30–35.

9. Манаков А. Д. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков и др. // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 1. — С. 28–39.

10. Яковенко М. С. Активное подавление гармоник во входном токе силового преобразователя электропривода компрессора / М. С. Яковенко, А. С. Анучин, Д. М. Шпак и др. // Электричество. — 2018. — № 12. — С. 41–46. — DOI: 10.24160/0013-5380-2018-12-41-46.

11. Патент № 2768302 Российская Федерация. Способ приема сигналов из линии индуктивной связи с компенсацией помехи от тягового тока и устройство для его осуществления: № 2021126736 заявл. 10.09.2021; опубл. 23.03.2022, Бюл. № 9 / А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Р. О. Рядчиков и др.

Дата поступления: 15.11.2024

Решение о публикации: 28.02.2025

Контактная информация:

РЯДЧИКОВ Руслан Олегович — аспирант;

ryadchikov.ro@yandex.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; vs.kuzmin@bk.ru

Compensation of Electromagnetic Interference Arising Due to Inductive Coupling Asymmetry of the Metro Locomotive Signalling with Automatic Speed Control

R. O. Ryadchikov, V. S. Kuzmin

Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Ryadchikov R. O., Kuzmin V. S. Compensation of Electromagnetic Interference Arising Due to Inductive Coupling Asymmetry of the Metro Locomotive Signalling with Automatic Speed Control // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 160–170. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-160-170

Summary

Purpose: Failures in the operation of the Metro locomotive automatic signalling with automatic speed control lead to slowdowns and stops in the Metro tunnels and train schedule disruptions. The most common cause of such failures is interference in the inductive coupling channel between trackside devices and train equipment. The article formulates a compensation scheme for a previously developed receiver for compensating electromagnetic interference, with the inductance coupling asymmetry of automatic locomotive signalling taken into account. This is caused by the geometrical position of the contact rail. **Methods:** Based on the previously published paper that generally formulated a condition for interference compensation in an inductive coupling channel with the geometrical position asymmetry of the receiving coils and the contact rail, and the Biot-Savart-Laplace law, a new expression was obtained that takes into account the inclusion of additional receiving coils inductively connected to the contact rail. **Results:** A mathematical calculation defining the interference compensation condition has been put forward. A number of specific dependencies have been obtained for the coefficient of proportionality for adjusting the operating parameters of the interference compensation device and the EMF induced in the main and additional receiving coils of automatic locomotive signalling when changing their position geometry. **Practical significance:** The simulation allows determining the coefficient of proportionality characterizing the difference in the position geometry of the main and additional receiving coils. This coefficient value for the given coil position geometry is the basis for adjusting the proposed device operation in depot environment.

Keywords: Electromagnetic compatibility, asymmetry, Metro, safety device, contact rail, third-rail conductor, inductive coupling, automatic locomotive signalling with automatic speed control.

References

1. Makhmutov K. M. *Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na metropolitene* [Devices for interval control of train traffic on the subway]. Moscow: Transport Publ., 1986, 351 p. (In Russian)

2. Manakov A. D., Kabetskiy A. G., Troshin A. A. et al. Asimetriya rel'sovykh tsepey s rele DSSH-2 [Asymmetry of track circuits with the DSSH-2 relay]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proce-

dings of Petersburg Transport University]. 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 280–297. (In Russian)

3. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Sidorenko V. G. Metod otsenki izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Method for assessing changes in the electromagnetic environment at the locations of interval control systems for train traffic]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2013, Iss. 3, pp. 35–40. (In Russian)

4. Pat. 5501416 (US). Method and apparatus for inductively receiving cab signaling on board a railway vehicle. Capan Ronald R. 1996.
5. Pat. 5501417 (US). Noise cancellation in railway cab signal. Capan Ronald R. 1996.
6. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Ryadchikov R. O. K voprosu o vozniknovenii pomekh v kanale induktivnoy svyazi na metropolitene za schet asimetrii geometricheskogo polozheniya kontaktnogo rel'sa [On the issue of interference in the inductive communication channel on the subway due to the asymmetry of the geometric position of the contact rail]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2022, Iss. 4, pp. 8–16. (In Russian)
7. Baranov L. A., Tabunshchikov A. K., Ryadchikov R. O. Otsenka garmonicheskikh sostavlyayushchikh tyagovogo toka v Moskovskom metropolitene na osnove eksperimental'nykh zamerov [Evaluation of harmonic components of traction current in the Moscow Metro based on experimental measurements]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 2, pp. 8–13. (In Russian)
8. Kabetskiy A. G. Metod otsenki vliyaniya garmonik tyagovogo toka podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom na rabotu ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na metropolitene [Method for assessing the influence of traction current harmonics of rolling stock with an asynchronous traction drive on the operation of railway automation and telemetry devices in the metro]. *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, Petergof, 18 maya 2021 goda* [Innovative Railway. The latest and promising systems for ensuring train traffic. Problems and solutions: collection of articles from the International scientific and theoretical conference, St. Petersburg, Peterhof, May 18, 2021]. St. Petersburg, Peterhof: Voennyi institut (zheleznodorozhnykh voysk i voennykh soobshcheniy) Publ., 2021, pp. 30–35. (In Russian)
9. Manakov A. D. et al. Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Standards of hazardous and disturbing influence of interference on ALS-ARS devices of the BARS system of the St. Petersburg metro]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2015, vol. 1, Iss. 1, pp. 28–39. (In Russian)
10. Yakovenko M. S., Anuchin A. S., Shpak D. M. et al. Aktivnoe podavlenie garmonik vo vkhodnom toke silovogo preobrazovatelya elektroprivoda kompressora [Active suppression of harmonics in the input current of the power converter of the compressor electric drive]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2018, Iss. 12, pp. 41–46. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-12-41-46. (In Russian)
11. Tabunshchikov A. K., Kuz'min V. S., Ryadchikov R. O. et al. *Sposob priema signalov iz linii induktivnoy svyazi s kompensatsiey pomekhi ot tyagovogo toka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for receiving signals from an inductive coupling line with compensation for traction current interference and a device for implementing it]. Patent RF, no. 2768302, 2022. (In Russian)

Received: November 15, 2024

Accepted: February 28, 2025

Author's information:

Ruslan O. RYADCHIKOV — Postgraduate Student;
ryadchikov.ro@yandex.ru

Vladislav S. KUZMIN — PhD in Engineering,
Associate Professor; vs.kuzmin@bk.ru

УДК 629.4.015

Стратегия развития интенсивности износа системы «колесо — рельс» с увеличенной осевой нагрузкой и особенностью конструкции экипажной части

Л. В. Мартыненко¹, Д. П. Кононов², С. В. Кротов³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Мартыненко Л. В., Кононов Д. П., Кротов С. В. Стратегия развития интенсивности износа системы «колесо — рельс» с увеличенной осевой нагрузкой и особенностью конструкции экипажной части // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 171–178. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-171-178

Аннотация

Цель: Определение интенсивности износа системы «колесо — рельс» с увеличенной осевой нагрузкой и особенностью конструкции экипажной части. **Методы:** Статистический анализ причинно-следственной связи возникновения факторов, влияющих на динамику вагона при прохождении неровностей пути, углубленный анализ системы взаимодействий между колесом и рельсом. Данный анализ позволяет объективно оценивать причины возникновения существующих проблем в области эксплуатации железнодорожного подвижного состава, описывать возникающие явления с достаточной степенью обоснования, предлагать прогрессивные актуальные решения и возможные перспективные развития железнодорожной отрасли. **Результаты:** Статистические данные технического состояния колесных пар, собранные за несколько лет, показали увеличение дефектов на поверхности катания, что связано не только с особенностями конструкции различных тележек, но и режимом ведения подвижного состава и реакцией рельс. Увеличение скоростей движения подвижного состава, рост объемов и количества перевозимых грузов приводят к повышению интенсивности эксплуатации подвижного состава. Следствием чего становится увеличение нагрузок на детали и узлы вагона и, соответственно, повышение интенсивности износа деталей. **Практическая значимость:** Стратегия развития интенсивности износа позволила определить многофакторность разных параметров, влияющих на возникновение продольных сил в системе «колесо — рельс». Наличие дефектов поверхности катания колес при расчетах в специальном программном продукте показало увеличение сил крипа. Анализ позволил выявить, что дефекты нужно разделить на несколько стандартных групп принадлежности по амплитудным колебаниям.

Ключевые слова: Колесо — рельс, дефекты поверхности катания, динамика вагона, интенсивность износа деталей, система «локомотив — вагон — путь».

Введение

Дефекты на поверхности катания колесных пар создают не только дополнительные колебания вагонов, но и при взаимодействии с рельсами

могут привести к износу рельсового полотна [1–5]. Отсюда возникает проблема взаимодействия системы «колесо — рельс», которая и приводит к последствиям различного характера,

Характеристики кривой на участке Танхой — Кедровая

Название перегона	Километр	Наименование дефекта	Степень отклонения	Диапазон отклонения, мм	Количество неисправностей
Танхой — Кедровая	13 807	Сужение колеи	2	6–15	42
			1	4	1
		Отступление в плане	2	40	350
			3	50	1
		Перекося	2	20	736
			3	25	3
		Уширение колеи	2	8–20	264
Отклонение по уровню	2	25	644		
Просадка	2	25	876		

таким как увеличение динамического воздействия на детали и узлы, рост сил реакции рельса, передающейся обратно вагону, дополнительный боковой износ рельса и др. (таблица).

Исследования, проведенные вагон-лабораториями, и расследование сходов подвижного состава показали, что неровности пути создают напряженное состояние в рельсовых нитях в кривых малого радиуса и переходных участках. Там, по статистике, происходит большее количество сходов [6–8].

Большинство изломов рельсов связано с концентрацией напряжений в переходных участках кривых (рис. 1). Это приводит к возникновению ряда отклонений как в проходящем подвижном составе, так и в земляном полотне. Величина отклонений зависит от вида неисправности, а также от типа тележек и их технического состояния [9].

В процессе исследований было выявлено, что на вершинах неровностей, особенно при односторонних просадках, возникают растягивающие напряжения в головке рельса и сжимающие в подошве. Наибольшие напряжения возникают в кривой при наличии неровностей IV степени [3]. В таких кривых увеличение кромочных напряжений при прочих равных условиях может достигать 50 %, что существенно влияет на допустимые скорости движения, а также может привести к излому рельса при вхождении локомотива на скорости в этот участок. Наибольшее воздействие на путь в плане и профиле оказывают электровозы с большой осевой нагрузкой.

Стратегия развития износа

Для определения стратегии развития износа в системе «колесо — рельс» необходимо провести ряд измерений и расчетов. С помощью специализированного оборудования необходимо проводить контроль состояния рельсового полотна

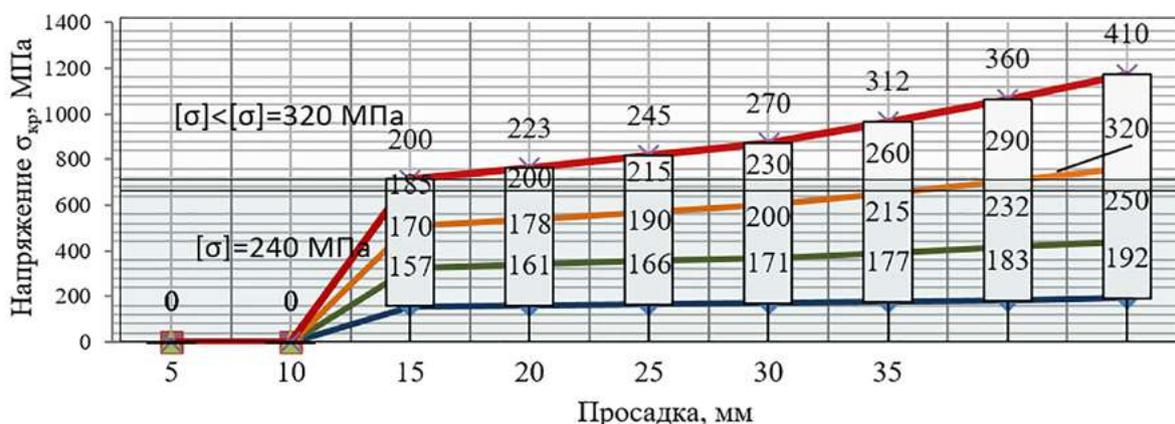


Рис. 1. Анализ кромочных напряжений рельса в кривой радиусом 200–450 м

через определенные периоды времени. Затем нужно исследовать полученные данные с целью выявления изменений за прошедший период времени. При этом устанавливаются первоначальные значения, т. е. значения для новых деталей без износа, и значения для деталей, которые в процессе эксплуатации имеют нормированный или интенсивный износ. Это позволяет сравнить характерные динамические всплески на определенных участках. Рассматривается тот участок пути, где предусмотрен определенный режим движения и скорость строго определена. Затем производится сравнение с действительной скоростью движения для того, чтобы определить добавки к динамической силе при текущем состоянии всей системы.

Сила давления ветра также рассчитывается для определения устойчивости вагона на пути в целом [10]. В процессе движения влияние давления ветра на сход минимально. Боковой ветер может повлиять только тогда, когда центробежная сила, возникающая из-за возвышения наружного рельса, увеличения расстояния между внутренними гранями ободьев колес, скорости движения и других параметров, возрастет и превысит допустимые значения. При этом каждый миллиметр бокового износа рельса увеличивает центробежную силу (рис. 2). Силы, возникающие

в рельсовых подкладках, могут достигать таких высоких значений, что могут сдвинуть рельсовые нити. В результате чего может произойти выброс рельса. Это приводит к уширению колеи, которое может привести к сходу вагона с пути.

Непогашенное ускорение также влияет на безопасность движения [11]. Оно соответствует норме только при отклонениях, которые не приводят к высоким динамическим значениям. При превышении этих показателей нужно менять скоростной режим, т. е. уменьшать скорость движения подвижного состава.

Методы исследования

Результаты обследований железнодорожного пути показали, что во многих случаях параметры рельсовой колеи не соответствовали заданным значениям. К примеру, если максимальный размер возвышения наружного рельса над внутренним составляет 150 мм и более, то движение обязательно закрывается. А если превышение 90 мм при допуске 80 мм, то этот дефект могут случайно пропустить. Тогда возникающее при этом непогашенное ускорение увеличивается в несколько раз и приводит к сходу вагона.

Устойчивость колесной пары зависит от многих факторов. Если рассматривать коэффициент устойчивости, то в нем преобладает влияние боковых и



Рис. 2. Интенсивность бокового износа рельса

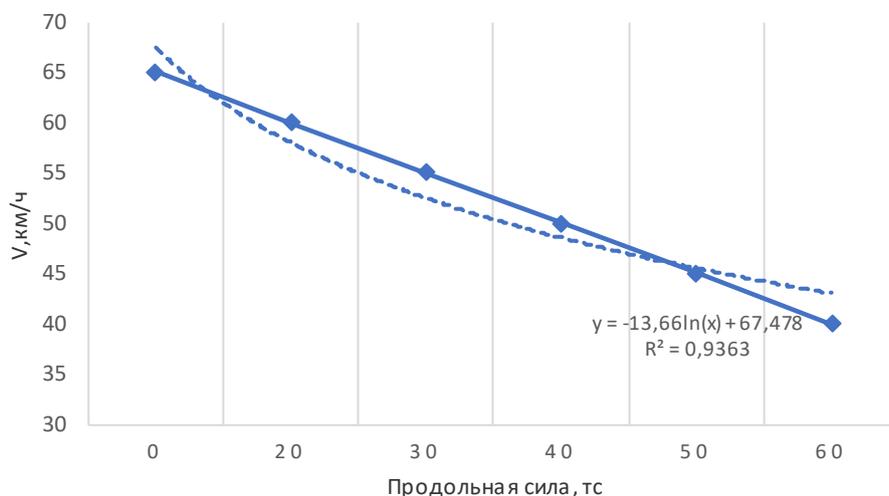


Рис. 3. Возникновение продольной силы при различных скоростях движения

вертикальных сил. Также на устойчивость влияют отклонения размеров колесной пары: каждый миллиметр отклонения повлияет на забегание гребня колеса на головку рельса. Известно, что коэффициент устойчивости не должен быть меньше 1,4, особенно при прохождении кривых участков, где создаются дополнительные силы [12, 13]. Продольные силы не должны превышать 30 тс, так как при наличии в составе порожних вагонов они будут подвержены выжиманию со стороны груженых.

Результаты исследования и их обсуждение

При составлении вагонов в составе необходимо учитывать динамическое воздействие в процессе эксплуатации, поэтому увеличение продольных сил связано не только с тормозными силами локомотива, но и загрузкой вагона, ведь известно, что чем больше нагружен грузовой вагон, тем меньше на него воздействует продольная сила [4]. Тогда возникает вопрос, откуда берутся большие продольные силы, если состав груженный (рис. 3). Для этого нужно изучить тип вагонов в составе: не является ли состав смешанным. Если есть порожние вагоны и они находятся не в хвосте состава, тогда появляется большая динамическая нагрузка, которая может привести к вползанию колеса на головку рельса.

Также на динамику влияет высота автосцепного устройства. Схематично его можно представить как брус, который имеет длину около двух метров, и шарнир в виде клина, который отвечает за поворот вагона в кривом участке пути.

Так как поворот обеспечивает полноценное вхождение в кривой участок пути, то целесообразно рассмотреть состояние автосцепного устройства как основную причину возникновения динамических всплесков в процессе эксплуатации. Клин изнашивается в процессе эксплуатации. Известно, что с изломом клина связаны многие факторы, такие как дополнительный выход автосцепного устройства из-за трещины тяговой полосы хвостовика, отказ поглощающего аппарата и др. При проведении расчетов продольная сила может уменьшить коэффициент устойчивости на 15–50 % в зависимости от приложенной силы от 20 до 40 тс (рис. 4).

Влияние вагонов, особенно порожних, появляется при скоростях от 60 км/ч. Именно при этой скорости начинают развиваться боковые колебания и теряется устойчивость вагона.

Возникновение продольных сил также связано с силами, которые появляются в пятне контакта колеса с рельсом. Силы трения, которые образуются в процессе взаимодействия колеса с

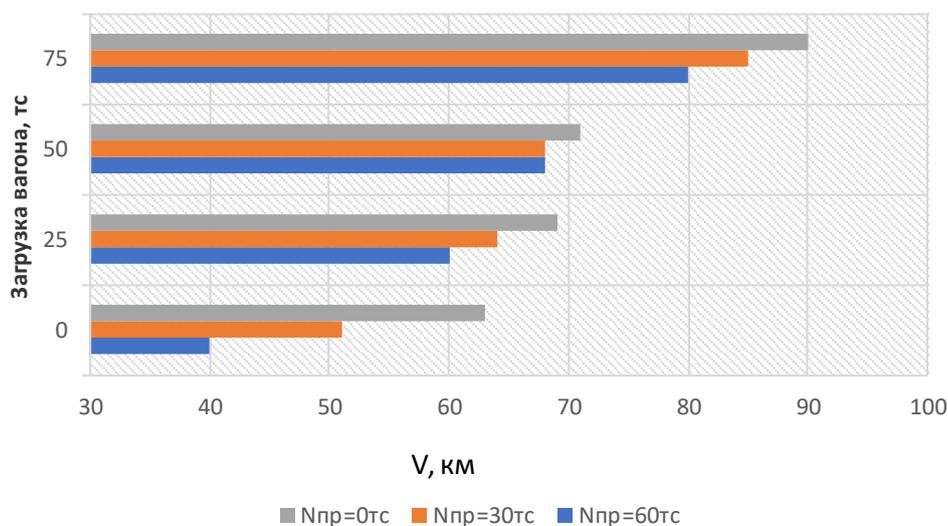


Рис. 4. Возникновение продольных сил в поезде в зависимости от загрузки вагона

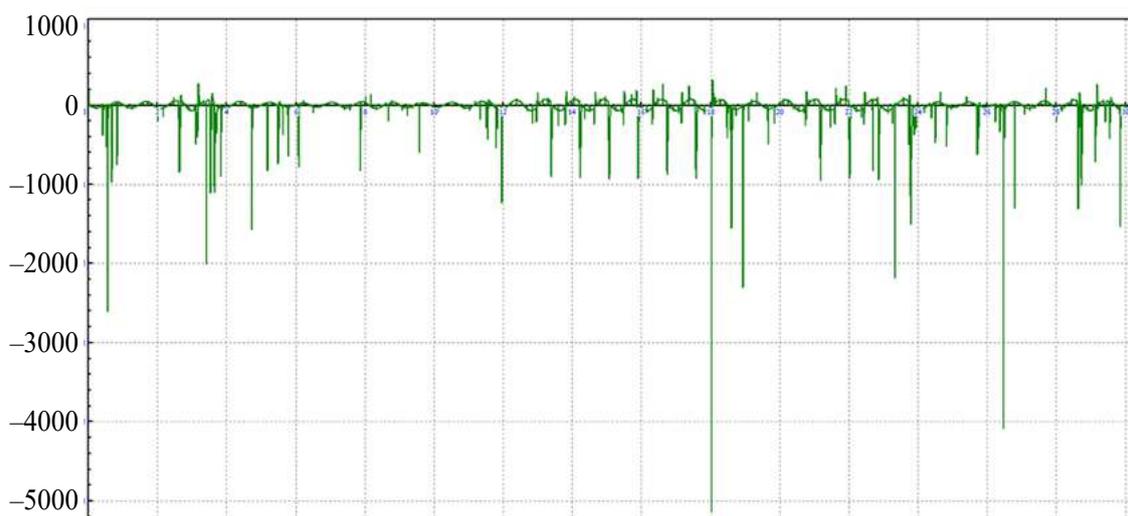


Рис. 5. Продольная сила крива на левом колесе с ползуном

рельсом, в идеале не должны иметь отклонений от нормативных значений, иначе это приведет к появлению дополнительных сил, вызванных проскальзыванием и, как следствие, возникновению дефектов на колесе или рельсе. В результате пятно контакта при взаимодействии системы «колесо — рельс» изменится, а силы, влияющие на устойчивость колесной пары в колее, увеличатся. Увеличение сил крива приводит к вилянию подвижного состава, так как нагрузка, приходящаяся на колесо, не изменяется в процессе эксплуатации, а пятно

контакта меняется, откуда следует, что изменение размера контактной поверхности приводит к увеличению амплитудного колебания, которое можно рассмотреть при заданных параметрах в специальных программах для расчета сил при движении подвижного состава (рис. 5) [14].

На данной диаграмме приведен пример расчета сил крива с ползуном на колесе. Видно, что появились дополнительные силы крива, которые приводят к увеличению нагрузки, смещению колесной пары, заваливанию кузова на одну

сторону. Также износ гребня колеса или боковой износ рельса может повлиять на интенсивность развития этих сил.

Заключение

Стратегия развития интенсивности износа, рассмотренная в данной статье, определила многофакторность разных параметров, влияющих на возникновение продольных сил в системе «колесо — рельс». Расчеты дефектов в специальном программном продукте показали увеличение сил крипа. Анализ позволил выявить, что дефекты нужно разделить на несколько стандартных групп принадлежности по амплитудным колебаниям. Ползуны глубиной до 0,15 мм значительного влияния на динамику движения вагона не оказывают, такой ползун «закатывается» в процессе эксплуатации. Ползуны глубиной до 0,4 мм при повторном попадании в зону движения юзом перерастают в ползуны браковочного размера. Ползуны глубиной до 0,8 мм являются причиной образования выщербин, ползуны глубиной более 0,9 мм оказывают серьезный динамический всплеск, что установлено в процессе эксплуатации. Ползуны или навары величиной более 3 мм вызывают резкое увеличение амплитуд напряжений в боковой раме в 1,5–2 раза, что вызывает снижение ресурса боковой рамы на 1,2–1,6 года.

Список источников

1. Аналитический материал о работе подвижного состава за период с 2004 по 2018 г. / Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства.
2. Боронахин А. М. Мобильная инерциальная система мониторинга рельсового пути / А. М. Боронахин, Е. Д. Бохман // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2011. — № 10. — С. 84–91.
3. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго. — М.: ПТКБ ЦПМПС, 1997. — 207 с.

4. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. — М.: Транспорт, 1986. — 560 с.

5. Богданов В. М. Снижение интенсивности износа гребней колес и бокового износа рельсов / В. М. Богданов // Железнодорожный транспорт, 1992. — № 12. — С. 30–34.

6. Галиев И. И. Влияние динамической нагруженности и дефектов роликов буксового подшипника на безопасность движения грузовых вагонов в эксплуатации / И. И. Галиев, В. А. Николаев, Б. Б. Сергеев и др. // Известия Транссиба. — 2013. — № 4(16). — С. 102–110.

7. Галиев И. И. Обеспечение эксплуатационной надежности и повышение безопасности движения грузовых вагонов / И. И. Галиев, Е. А. Самохвалов, Д. Ю. Лукс // II Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава»: сборник трудов. — Омск, 2013. — С. 19–25.

8. Галиев И. И. Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации / И. И. Галиев, В. А. Николаев, Б. Б. Сергеев и др. // Известия Транссиба. — 2013. — № 3(15). — С. 133–142.

9. Martynenko L. V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths / L. V. Martynenko // Transport research procedure. — 2022. — Vol. 63. — Pp. 65–471. — DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/>.

10. Вершинский С. В. Динамика вагона: учебник для вузов железнодорожного транспорта / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов; под ред. С. В. Вершинского. — 3-е издание. — М.: Транспорт, 1991. — С. 96.

11. Белоусов А. В. Применение рессорного подвешивания с билинейной характеристикой для улучшения динамических качеств грузовых вагонов: дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Белоусов. — М., 2000. — 165 с.

12. Ромен Ю. С. Особенности математического моделирования динамических процессов прохождения вагоном стрелочного перевода / Ю. С. Ромен, Б. Э. Глюзберг, Е. А. Тимакова и др. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). — 2020. — № 79(3). — С. 119–126. — DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-3-119-126.

13. Romen Yu. S. The stability of the movement of cars on bogies 18-100 / Yu. S. Romen // Russian Railway Science Journal. — 2019. — Vol. 78. — Iss. 3. — Pp. 149–154. — DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154.

Дата поступления: 10.01.2025

Решение о публикации: 27.02.2025

Контактная информация:

МАРТЫНЕНКО Любовь Викторовна — соискатель;
liuba.martinenko@yandex.ru

КОНОНОВ Дмитрий Павлович — д-р техн. наук, доц.;
d_kononov@mail.ru

КРОТОВ Сергей Викторович — канд. техн. наук, доц.;
svk-19587@yandex.ru

Strategy for the Wheel-Rail Wear Rate Development with Increased Axial Load and a Car Underframe Specific Design

L. V. Martynenko¹, D. P. Kononov², S. V. Krotov³

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

³Rostov State Transport University, 2, Rostov Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Martynenko L. V., Kononov D. P., Krotov S. V. Strategy for the Wheel-Rail Wear Rate Development with Increased Axial Load and a Car Underframe Specific Design // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 171–178. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-171-178

Summary

Purpose: To determine the wheel-rail wear rate with increased axial load and a car underframe specific design.

Methods: Statistical analysis of the cause-and-effect relationship of the factors affecting the dynamics of a train car passing over the track irregularities; in-depth analysis of the wheel-rail interaction system. This analysis allows assessing the causes of existing problems in the field of railway rolling stock operation as well as substantiating emerging issues, and proposing relevant up-to-date solutions and promising developments in the railway industry. **Results:** Statistical data on the wheelset technical condition collected over several years have shown an increase in wheel rolling surface defects, which is due to not only a variety of the underframe design features, but also rolling stock driving behaviour and rail response. Increased speeds of rolling stock movement and growth in the transported goods volume and quantity lead to an intensified rolling stock operation. Hence, increased loads on the train car units and components, and, respectively, increased wear intensity of the parts. **Practical significance:** The strategy for the wear intensity development made it possible to define various parameters causing longitudinal forces in the wheel-rail system. The software calculations have demonstrated that wheel rolling surface defects cause increased creep forces. The analysis has revealed that the defects can be divided into several standard groups according to amplitude fluctuations.

Keywords: Wheel-rail, rolling surface defects, car dynamics, wear rate of parts, locomotive-car-track system.

References

1. Analiticheskiy material o rabote podvizhnogo sostava za period s 2004 po 2018 g. [Analytical material on the

operation of rolling stock for the period from 2004 to 2018]. *Proektno-konstruktorskoe byuro vagonnogo khozyaystva* [Design Bureau of Wagon Facilities]. (In Russian)

2. Boronahin A. M., Bohman E. D. Mobil'naya inercial'naya sistema monitoringa rel'sovogo puti [Mobile inertial system for monitoring the track]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI" SPbGETU "LETI"* [Bulletin of the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" ETU "LETI"]. 2011, Iss. 10, pp. 84–91. (In Russian)
3. Verigo M. F. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebney koles* [Interaction of the track and rolling stock in small-radius curves and the fight against lateral wear of rails and wheel flanges] Moscow: PTKB CPMPS Publ., 1997, 207 p. (In Russian)
4. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of the track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986, 560 p. (In Russian)
5. Bogdanov V. M. Snizhenie intensivnosti iznosa grebney koles i bokovogo iznosa rel'sov [Reducing the intensity of wheel flange wear and lateral wear of rails]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1992, Iss. 12, pp. 30–34. (In Russian)
6. Galiev I. I., Nikolaev V. A., Sergeev B. B. et al. Vliyanie dinamicheskoy nagruzhennosti i defektov rolikov buksovogo podshipnika na bezopasnost' dvizheniya gruzovykh vagonov v ekspluatatsii [Influence of dynamic loading and defects of axle box bearing rollers on the safety of freight cars in operation]. *Izvestiya Transsiba* [Transsib News]. 2013, Iss. 4(16), pp. 102–110. (In Russian)
7. Galiev I. I., Samohvalov E. A., Luks D. Yu. Obespechenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti i povyshenie bezopasnosti dvizheniya gruzovykh vagonov [Ensuring operational reliability and improving the safety of freight car traffic]. *II Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava": sbornik trudov* [II All-Russian scientific and technical conference with international participation "Technological support for repair and improving the dynamic qualities of railway rolling stock": collection of papers]. Omsk, 2013, pp. 19–25. (In Russian)
8. Galiev I. I., Nikolaev V. A., Sergeev B. B. et al. Prichiny narusheniya bezopasnosti dvizheniya gruzovykh vagonov v ekspluatatsii [Causes of violation of freight car traffic safety during operation]. *Izvestiya Transsiba* [Transsib News]. 2013, Iss. 3(15), pp. 133–142. (In Russian)
9. Martynenko L. V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths. *Transport research procedure*, 2022, vol. 63, pp. 465–471. DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/>.
10. Vershinskiy S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta; pod red. S. V. Vershinskogo; 3-e izdanie* [Car dynamics: a textbook for higher education institutions of railway transport; edited by S. V. Vershinsky; 3rd edition]. Moscow: Transport Publ., 1991, p. 96. (In Russian)
11. Belousov A. V. *Primenenie resornogo podveshivaniya s bilineynoy kharakteristikoy dlya uluchsheniya dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Application of spring suspension with bilinear characteristics to improve the dynamic qualities of freight cars: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Moscow, 2000, 165 p. (In Russian)
12. Romen Yu. S., Glyuzberg B. E., Timakova E. A. et al. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov prokhozheniya vagonom strelochnogo perevoda [Features of mathematical modeling of dynamic processes of a car passing through a turnout]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (VESTNIK VNIIZhT)* [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport (VESTNIK VNIIZhT)]. 2020, Iss. 79(3), pp. 119–126. DOI: 10.21780/2223-9731-2020-79-3-119-126. (In Russian)
13. Romen Yu. S. The stability of the movement of cars on bogies 18-100. *Russian Railway Science Journal*, 2019, vol. 78, Iss. 3, pp. 149–154. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-149-154.

Received: January 10, 2025

Accepted: February 27, 2025

Author's information:

Lyubov' V. MARTYNENKO – the Applicant;

liuba.martinenko@yandex.ru

Dmitry P KONONOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor;

d_kononov@mail.ru

Sergey V. KROTOV — PhD in Engineering, Associate

Professor; svk-19587@yandex.ru



УДК 004.624:004.021

Ускорение вычисления CRC в устройствах на базе программируемых логических интегральных схем

А. А. Блюдов, Е. А. Волков, Ю. В. Иванов, Г. Ю. Пронин

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

Для цитирования: Блюдов А. А., Волков Е. А., Иванов Ю. В., Пронин Г. Ю. Ускорение вычисления CRC в устройствах на базе программируемых логических интегральных схем // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 179–185. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-179-185

Аннотация

Цель: Разработать метод, позволяющий увеличить скорость вычисления CRC для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), превосходящий по скорости метод непосредственного расчета путем циклического сдвига. **Методы:** Для проведения экспериментальных исследований использовалось компьютерное моделирование. Для теоретических исследований применены метод аналитического обзора, теория помехозащитного кодирования. **Результаты:** Предложен и описан метод расчета CRC для посылок постоянной длины с применением произвольных полиномов. Представлены некоторые результаты сравнения контрольных разрядов кодов с наименьшей избыточностью и циклических избыточных кодов. **Практическая значимость:** Описанный в статье метод позволяет качественно быстрее производить вычисление CRC на базе ПЛИС, нежели ранее используемые. Получен способ, позволяющий ускорить расчет циклического избыточного кода для произвольных полиномов при условии фиксированной длины посылки.

Ключевые слова: Помехозащитное кодирование, циклический избыточный код, ПЛИС, кодовое состояние, разделимые коды.

Введение

Метод кодирования CRC получил широкое распространение в современной технике. В современных системах СЦБ существует множество каналов передачи информации, в которых используется именно этот метод помехозащитного кодирования. При этом не редка та ситуация, когда все сообщения в канале имеют постоянную длину [1, 2].

Также все активнее внедряются программируемые логически интегральные схемы [3, 4]. Принципиально другая относительно микроконтроллеров архитектура ПЛИС позволяет проек-

тировать устройства, значительно опережающие по быстродействию аналогичные устройства на базе микроконтроллеров для целого ряда задач. Это не влечет необходимость использовать или иные алгоритмы, или иные методы непосредственных вычислений. Однако копирование методов, применяемых на другой элементной базе, ведет к неоптимальному использованию ресурсов, которые в ПЛИС значительно более ограничены, чем у микроконтроллеров. В тех же задачах, где приоритетным является не экономия ресурсов, а быстродействие устройства, копи-

вание методов другой элементной базы может оказаться далеко не самым быстрым вариантом.

В данной работе исследуются способы получения контрольных разрядов, получаемых после вычисления CRC, а также способы их ускоренного вычисления на базе ПЛИС.

Используемые обозначения

k — число контрольных разрядов;

i_j — информационный разряд;

j — номер информационного разряда (0 — младший информационный разряд).

k_{xy} — контрольный разряд. $k_{xy} = i_x \oplus i_y$;

d — кодовое расстояние.

1. Краткие теоретические обоснования

Ускорение обработки информации может осуществляться различными способами. В данной статье преимущественно рассматривается ПЛИС в качестве кодирующего и декодирующего устройства в канале передачи информации. В частности, возможность вычисления логических операций, реализуемых с помощью комбинационных схем за один такт. Традиционный способ вычисления CRC, предполагающий многократное непосредственное деление на полином, может быть сведен к построению комбинационной схемы. Некоторое затруднение вызывает тот факт, что правила получения контрольных разрядов и, как следствие, комбинационная схема будут отличаться не только для каждого полинома, но и в том случае, когда используется отдельный полином, кодирует информационные векторы разной длины.

Также важным аспектами являются скорость передачи информации и минимальное кодовое расстояние. Коды с наименьшей избыточностью по определению обладают лучшим соот-

ношением минимального кодового расстояния и скорости. Существенным недостатком для этих кодов является сложность декодирования. Для векторов разной длины при одном и том же полиноме циклические коды формируют контрольные разряды, аналогичные разрядам кодов с наименьшей избыточностью или имеющие такие же свойства, задачи кодирования и декодирования значительно упрощаются.

2. Сравнение контрольных разрядов кодов с наименьшей избыточностью и циклических избыточных кодов

В результате вычисления контрольных разрядов CRC могут быть получены разряды вида:

- нулевой разряд;
- разряд, повторяющий один из информационных;
- контрольный разряд, который представляет собой результат вычисления суммы по модулю 2 нескольких информационных разрядов.

Это очевидным образом следует из работ [5–7].

Для простоты рассмотрим случай $k = 3$. В [8] приведены коды с минимальной избыточностью:

Для сравнения контрольных разрядов, которые получаются в результате вычисления CRC, с приведенными в табл. 1 осуществим перебор полиномов. Верхнюю границу перебора определим для полиномов, соответствующих приведенным в табл. 1 структурам:

а) для k разрядов общее число способов вычисления возможных контрольных разрядов, представляющих собой все возможные суммы информационных разрядов по модулю 2, равно $C_k^1 + C_k^2 + \dots + C_k^k$.

Так как $C_k^1 + C_k^2 + \dots + C_k^k = 2^k - 1$, а C_k^1 представляет собой количество информационных раз-

Таблица 1. Коды с минимальной избыточностью $k = 3$

Минимальное кодовое расстояние	$d_{\min} = 1$	$d_{\min} = 2$	$d_{\min} = 3$	$d_{\min} = 4$
Структура разрядов	i_2, i_1, i_0	i_2, i_1, i_0, k_{012}	$i_2, i_1, i_0, k_{01}, k_{02}, k_{12}$	$i_2, i_1, i_0, k_{01}, k_{02}, k_{12}, k_{012}$

Таблица 2. Контрольные разряды CRC от $k = 3$

Десятичный эквивалент	Двоичный эквивалент	Полином	Контрольные разряды
$d = 2$			
3	11	$x^1 \oplus x^0$	k_{012}
$d = 3$			
11	1011	$x^3 \oplus x^1 \oplus x^0$	k_{12}, k_{012}, k_{02}
13	1101	$x^3 \oplus x^2 \oplus x^0$	k_{01}, k_{12}, k_{012}
$d = 4$			
23	10111	$x^4 \oplus x^2 \oplus x^1 \oplus x^0$	$k_{12}, k_{01}, k_{012}, k_{02}$
29	11101	$x^4 \oplus x^3 \oplus x^1 \oplus x^2$	$k_{02}, k_{012}, k_{12}, k_{01}$

рядов, то максимальное количество отличных друг от друга контрольных разрядов равно $2^k - k - 1$;

б) если количество контрольных разрядов равно $2^k - k - 1$ и все контрольные разряды являются уникальными, то кодовое расстояние между двумя произвольными кодовыми словами одинаково;

в) в случае если кодовое расстояние между двумя произвольными кодовыми словами одинаково, то для увеличения минимального кодового расстояния на 1 требуется добавить k разрядов [9–10];

г) количество контрольных разрядов на единицу меньше длины полинома.

Определим длину полинома. Для этого рассчитаем количество контрольных разрядов. Исходя из частного случая бинома Ньютона следует, что общее количество разрядов, включая нулевой, составляет 2^k . Исключая нулевой и информационные разряды, получим:

$$2^k - C_k^0 - C_k^1 = 2^k - 1 - k.$$

Поскольку длина полинома на один больше количества контрольных разрядов, то перебор полиномов имеет смысл осуществлять до $2^{(2^k - k)} - 1$.

Из результатов рассмотрим только те контрольные разряды, вычисления которых пред-

ставляют собой суммы по модулю 2 информационных разрядов.

Сравнивая табл. 1, 2, заметим, что код с контрольными разрядами k_{01}, k_{02}, k_{12} есть только в одной из них. Путем полного перебора показано, что не существует такого полинома, в результате вычисления которого получились только вышеописанные разряды. Это показывает, что в общем случае для произвольных кодовых разрядов может не существовать полинома, с помощью которого можно получить их путем циклического деления. Однако сам факт широкого распространения CRC показывает, что для многих протоколов связи его защитных свойств достаточно.

3. Вычисление CRC на базе ПЛИС

При переходе на элементную базу ПЛИС непосредственный расчет CRC занимает несколько тактов. Использование табличного подхода к расчету CRC, получившего широкое распространение в системах, построенных на базе микроконтроллеров, в зависимости от полинома может занимать достаточно большое количество памяти, количество которой в ПЛИС существенно ограничено. При этом построение комбинационной схемы является несложной задачей, а результат ее вычислений может быть получен за один такт. Поэтому целесообразно перейти к непосредственному вычислению контрольных разрядов.

Основываясь на свойствах циклических кодов, описанных в статье [5], опишем способ вычисления контрольных разрядов для заданного полинома и k , не пользуясь методом перебора. В качестве примера рассмотрим случай $k = 3, p = 11$.

Пример:

Запишем информационный вектор в виде полинома.

$$p = x_2 \oplus x_1 \oplus x_0$$

Старшая степень полинома p равна 3. Умножим на нее информационный вектор:

$$(x_2 \oplus x_1 \oplus x_0) x_3 = x_5 \oplus x_4 \oplus x_3.$$

Рассчитаем остаток от деления каждого разряда на полином (рис. 1–3).

$$\begin{array}{r|rrr} x^3 & & & \\ x^3 & x^1 & x^0 & \\ \hline & x^1 & x^0 & \end{array} \quad \begin{array}{r|rrr} x^3 & x^1 & x^0 & \\ \hline x^0 & & & \end{array}$$

Рис. 1. Расчет остатка от деления x^3 на полином

$$\begin{array}{r|rrr} x^4 & & & \\ x^4 & x^2 & x^1 & \\ \hline & x^2 & x^1 & \end{array} \quad \begin{array}{r|rrr} x^3 & x^1 & x^0 & \\ \hline x^1 & & & \end{array}$$

Рис. 2. Расчет остатка от деления x^4 на полином

$$\begin{array}{r|rrr} x^5 & & & \\ x^5 & x^3 & x^2 & \\ \hline & x^3 & x^2 & \\ & x^3 & & \\ \hline & & x^1 & x^0 \end{array} \quad \begin{array}{r|rrr} x^3 & x^1 & x^0 & \\ \hline x^2 & x^0 & & \\ & & & \\ & & & \\ \hline & x^1 & x^0 & \end{array}$$

Рис. 3. Расчет остатка от деления x^5 на полином

Таблица 3. Таблица определения контрольных разрядов

Остатки от деления			Делимый полином	Информационный разряд
x^1	x^0			
			x^3	x^0
x^2	x^1		x^4	x^1
x^2	x^1	x^0	x^5	x^2
Контрольные разряды				
k_{12}	k_{012}	k_{02}		

Результаты запишем в табл. 3. Количество строк в таблице определения контрольных разрядов (табл. 3) соответствует числу кодируемых информационных разрядов. Количество столбцов равно старшей степени полинома.

Остаток деления информационного разряда, умноженного на старший член полинома, записывается в соответствующую строку.

Каждому столбцу этой таблицы соответствует контрольный разряд. В тех столбцах, где есть x^i , этот информационный разряд будет участвовать

в формировании контрольного. Таким образом, в результате циклического деления на полином $p = 11$ вектора из трех информационных разрядов получим контрольные разряды k_{12} , k_{012} , k_{02} . При этом порядок контрольных разрядов в табл. 3 соответствует порядку контрольных разрядов, получаемых при делении с остатком информационного вектора на полином.

Сравнение скоростей вычислительных методов

Вышеописанный метод актуален только для протоколов с блочным помехозащитным кодированием. Так как протоколы многих микропроцессорных систем являются корпоративной тайной, провести количественную оценку применимости разработанной методологии затруднительно. Из того, что можно привести в литературе общего доступа, авторы статьи могут указать только на тот факт, что все помехозащитные коды, применяемые в МПЦ-МПК, являются блочными.

Для сравнения скорости произведения расчетов рассмотрим три метода декодирования:

1. Метод, описанный в статье.
2. «Классический» метод декодирования.
3. Табличный метод декодирования.

Для корректной оценки времени учтем возможность декодирования в процессе приема сообщения. Также следует учесть пакетный характер посылок. Оценку времени будем проводить в тактах и условном времени.

1. Для описанного в статье метода время от получения последнего пакета с информационной частью до расчета контрольной части будет равно времени расчета комбинационной. На базе ПЛИС этот расчет займет один такт.

2. В «классическом» методе понадобится один такт для того, чтобы взять один информационный бит и еще один такт для сложения его по модулю 2 с ранее рассчитанным остатком. Таким образом, расчет займет $2k$ тактов.

3. При использовании табличного метода декодирования возможна различная организация памяти таблицы и поиска по ней. Количество тактов, необходимых для поиска по таблице, обозначим за t . Также необходим еще один такт на вычисление. Время, затраченное на вычисление табличным методом, составит $(t + 1)k / k_B$ тактов, где k_B — это длина табличного блока.

В табл. 4 представлены скорости вычисления CRC при декодировании после приема сообщения.

В связи с тем, что предложенный метод служит для увеличения скорости декодирования, необходимо провести оценку скорости в случае декодирования в процессе приема сообщений.

1. Для описанного метода декодирование возможно только после полного приема сообщений. Поэтому время от приема последнего информационного бита до расчета контрольных бит не изменится.

2. Для «классического» метода время расчета сократится до скорости расчета последнего пакета, $2k_{II}$.

3. Для табличного метода время зависит от длины блока. В случае если она больше или равна длине пакета, то время декодирования составит 3 такта. Если же длина блока меньше длины пакета (что представляется нецелесообразным), то декодирование займет $(t + 1)k_{II} / k_B$.

В табл. 5 представлены скорости вычисления CRC при декодировании во время приема сообщения.

Это показывает, что на одинаковой аппаратной базе предложенный метод является самым быстрым из решений.

В предложенном методе есть существенное ограничение. При использовании одного и того же полинома разное количество информационных бит требует разных декодирующих автоматов. Это вызывает необходимость строить их индивидуально.

Таблица 4. Скорости вычисления CRC при декодировании после приема сообщения

	Метод приведения к комбинационной схеме	«Классический» метод	Табличный метод
Количество тактов	1	$2k$	$(t + 1)k / k_B$

Таблица 5. Скорости вычисления CRC при декодировании во время приема сообщения

	Метод приведения к комбинационной схеме	«Классический» метод	Табличный метод
Количество тактов	1	$2k_{II}$	$(t + 1)$

Заключение

В статье приведено сравнение некоторых кодов с наименьшей избыточностью с циклическими избыточными кодами. Путем перебора было показано, что контрольные разряды, полученные в результате вычисления некоторых полиномов, не всегда совпадают с контрольными разрядами кодов с минимальной избыточностью. Это показывает, что не все контрольные разряды могут быть вычислены как остаток от деления информационного вектора на полином.

Также представлен способ определения контрольных разрядов для произвольных полиномов и информационных векторов, позволяющий построить комбинационные схемы для произвольных полиномов.

Кроме того, в статье описан метод ускорения вычисления CRC на базе программируемых логических интегральных схем путем непосредственного расчета значения контрольных разрядов. Описанный в статье метод является актуальным способом ускорения расчетов для каналов с постоянной длиной сообщений, где функции кодиру-

щего и декодирующего устройства реализованы на базе ПЛИС. Он сводит расчет остатка от деления к простой комбинационной схеме, выходы которой могут быть получены за один такт.

Список источников

1. Прохорова Г. М. Оборудование станции устройствами микропроцессорной централизации ЭЦ-ЕМ с увязкой с системой диагностирования и мониторинга (АДК-СЦБ) / Г. М. Прохорова // Форум молодых ученых. — 2017. — № 6(10).

2. Калинин Т. С. Спектрально-сигнатурная диагностика микропроцессорных информационно-управляющих систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. С. Калинин // ИВД. — 2012. — № 1.

3. Федухин А. В. ПЛИС-системы как средство повышения отказоустойчивости / А. В. Федухин, А. А. Муха // ММС. — 2010. — № 1. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/plis-sistemy-kak-sredstvo-povysheniya-otkazoustoichivosti>.

4. Тарасов И. Проектирование конфигурируемых процессоров на базе ПЛИС / И. Тарасов // Компоненты и Технологии. — 2006. — № 57. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-konfiguriruemyh-protssessorov-na-baze-plis-1>.

5. Berlekamp E. R. A Construction for Partitions Which Avoid Long Arithmetic Progressions / E. R. Berlekamp // Canadian Mathematical Bulletin. — 1968. — Vol. 11. — Iss. 3. — Pp. 409–414. — DOI: 10.4153/CMB-1968-047-7.

6. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes / R.W. Hamming // The Bell System Technical Journal. — 1950. — Vol. 29. — Iss. 2. — DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.

7. Sridevi N. Implementation of Error Correction Techniques in Memory Applications / N. Sridevi, K. Jamal, K. Mannem // 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication. — April 08–10 2021. — DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418432.

8. Блюдов А. А. Распределение мощности кодов с наименьшей избыточностью алфавитов в зависимости от количества бит и кодового расстояния / А. А. Блюдов, Д. В. Пивоваров, Г. Ю. Пронин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — № 2. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-moschnosti-kodov-s-naimenshey-izbytochnostyu-alfavitov-v-zavisimosti-ot-kolichestva-bit-i-kodovogo-rasstoyaniya>.

9. Shahariar Parvez A. H. M. Design and implementation of hamming encoder and decoder over FPGA / A. H. M. Shahariar Parvez et al. // International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2018. — Springer Singapore, 2019. — Pp. 1005–1022.

10. Panem C. Polynomials in Error Detection and Correction in Data Communication System / C. Panem, V. Gad, R. Gad // Coding Theory. — 2019. — P. 29.

Дата поступления: 01.10.2024

Решение о публикации: 25.11.2024

Контактная информация:

БЛЮДОВ Антон Александрович — канд. техн. наук;

blyudov@pgups.ru

ВОЛКОВ Егор Алексеевич — аспирант;

volkov@crtc.spb.ru

ИВАНОВ Юрий Владимирович — аспирант;

DeusIlluminatus@yandex.ru

ПРОНИН Георгий Юрьевич — аспирант;

georgiy3pronin@gmail.com

Acceleration of Software CRC Calculation Based on Programmable Logic Integrated Circuits

A. A. Blyudov, E. A. Volkov, Yu. V. Ivanov, G. Yu. Pronin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Blyudov A. A., Volkov E. A., Ivanov Yu. V., Pronin G. Yu. Acceleration of Software CRC Calculation Based on Programmable Logic Integrated Circuits // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 179–185. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-179-185

Summary

Purpose: To develop a method for increasing the speed of CRC computation for programmable logic integrated circuits (PLICs) that exceeds the speed of the direct computation method by cyclic shift. **Methods:** Computer simulation has been used for experimental studies. The analytical review method and the theory of noise protection coding have been used for theoretical studies. **Results:** A CRC calculation method for constant length messages using arbitrary polynomials is proposed and described. Control digit codes with minimum redundancy and cyclic redundant codes have been compared and the results are presented. **Practical significance:** The method described allows for a qualitatively faster CRC calculation based on FPGAs than those previously used. A method for accelerating the calculation of cyclic redundancy code for arbitrary polynomials has been developed provided that the message length is fixed.

Keywords: Anti-jamming coding, cyclic redundancy code, FPGA, code distance, separable codes.

References

1. Prokhorova G. M. Oborudovanie stantsii ustroystvami mikroprotssornoy tsentralizatsii ETs-EM s uvyazkoy s sistemoy diagnostirovaniya i monitoringa (ADK-STsB) [Equipping a station with EC-EM microprocessor centralization devices linked to the diagnostics and monitoring system (ADK-SCB)]. *Forum molodykh uchenykh* [Forum of young scientists]. 2017, Iss. 6(10). (In Russian)
2. Kalinin T. S. Spektral'no-signaturnaya diagnostika mikroprotssornykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Spectral-signature diagnostics of microprocessor information and control systems of railway automation and telemechanics]. *IVD*, 2012, Iss. 1. (In Russian)
3. Fedukhin A. V., Mukha A. A. PLIS-sistemy kak sredstvo povysheniya otkazoustoychivosti [FPGA systems as a means of increasing fault tolerance]. *MMS*, 2010, Iss. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/plis-sistemy-kak-sredstvo-povysheniya-otkazoustoychivosti>. (In Russian)
4. Tarasov I. Proektirovanie konfiguriruemykh protssorov na baze PLIS [Design of configurable processors based on FPGA]. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies]. 2006, Iss. 57. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-konfiguriruemyh-protssorov-na-baze-plis-1>. (In Russian)
5. Berlekamp E. R. A Construction for Partitions Which Avoid Long Arithmetic Progressions. *Canadian Mathematical Bulletin*, 1968, vol. 11, Iss. 3, pp. 409–414. DOI: 10.4153/CMB-1968-047-7.
6. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes. *The Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, Iss. 2. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x.
7. Sridevi N., Jamal K., Mannem K. Implementation of Error Correction Techniques in Memory Applications. 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication. April 08–10 2021. DOI: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418432.
8. Blyudov A. A., Pivovarov D. V., Pronin G. Yu. Raspredelenie moshchnosti kodov s naimen'shey izbytochnost'yu alfavitov v zavisimosti ot kolichestva bit i kodovogo rasstoyaniya [Distribution of the power of codes with the least redundancy of alphabets depending on the number of bits and the code distance]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering]. 2023, Iss. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-moshchnosti-kodov-s-naimenshey-izbytochnostyu-alfavitov-v-zavisimosti-ot-kolichestva-bit-i-kodovogo-rasstoyaniya>. (In Russian)
9. Shahariar Parvez A. H. M. et al. Design and implementation of hamming encoder and decoder over FPGA. *International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2018*. Springer Singapore, 2019, pp. 1005–1022.
10. Panem C., Gad V., Gad R. Polynomials in Error Detection and Correction in Data Communication System. *Coding Theory*, 2019, p. 29.

Received: October 01, 2024

Accepted: November 25, 2024

Author's information:

Anton A. BLYUDOV — PhD in Engineering;

blyudov@pgups.ru

Egor A. VOLKOV — Postgraduate Student;

volkov@crtc.spb.ru

Yuriy V. IVANOV — Postgraduate Student;

DeusIlluminatus@yandex.ru

Georgiy Yu. PRONIN — Postgraduate Student;

georgiy3pronin@gmail.com

УДК 614.864

Снижение рисков травмирования при использовании электросамокатов

Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров

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

Для цитирования: Канонин Ю. Н., Тихомиров О. И. Снижение рисков травмирования при использовании электросамокатов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 186–195. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-186-195

Аннотация

Цель: Определить основные причины несчастных случаев при использовании электросамокатов, оценить зарубежный и отечественный опыт по снижению травматизма, предложить мероприятия по уменьшению опасности для пешеходов и пользователей электросамокатов. **Методы:** Анализ статистических данных несчастных случаев с пешеходами и пользователями электросамокатов в дорожно-транспортных происшествиях с оценкой характера и тяжести травм. Анализ организационных и технических методов, применяемых в зарубежных странах для снижения опасности травмирования.

Практическая значимость: Выполнена оценка существующих методов снижения травматизма при использовании электросамокатов в России и за рубежом, предложены мероприятия, которые позволят снизить опасность травмирования граждан при использовании средств индивидуальной мобильности.

Ключевые слова: Средства индивидуальной мобильности, электросамокаты, травматизм, риск травмирования, дорожно-транспортные происшествия.

Средства индивидуальной мобильности (СИМ) с каждым годом захватывают все новые и новые территории РФ. Количество пользователей стремительно растет, а число поездок только на арендованных электросамокатах за 2023 год превысило двести миллионов. Причем чаще всего используются не приобретенные для личного пользования электросамокаты, а принадлежащие кикшеринговым компаниям¹. В теплый период года электросамокаты часто заменяют общественный транспорт, позволяя быстро добраться до места учебы или работы, до станций метро и других пунктов назначения. Другими, гораздо реже встречающимися средствами индивидуальной мобильности являются электро-

скейтборды, гироскутеры, сегвеи, моноколеса и иные аналогичные средства, которые согласно ПДД [1] являются транспортными средствами, имеющими одно или несколько колес (роликов), и предназначены для индивидуального передвижения человека посредством использования двигателя. Поскольку среди СИМ преобладают электросамокаты, выполним анализ основных опасностей, возникающих при их использовании, а также рассмотрим практику предотвращения травматизма в зарубежных странах и в Российской Федерации.

Анализ травматизма при использовании электросамокатов

Статистика кикшеринговых компаний России показывает, что постепенно снижаются средняя длина и средняя продолжительность поездок при

¹ Кикшеринг (от англ. *kick scooter sharing* — передача другому самокатов) — система краткосрочной аренды электросамокатов.

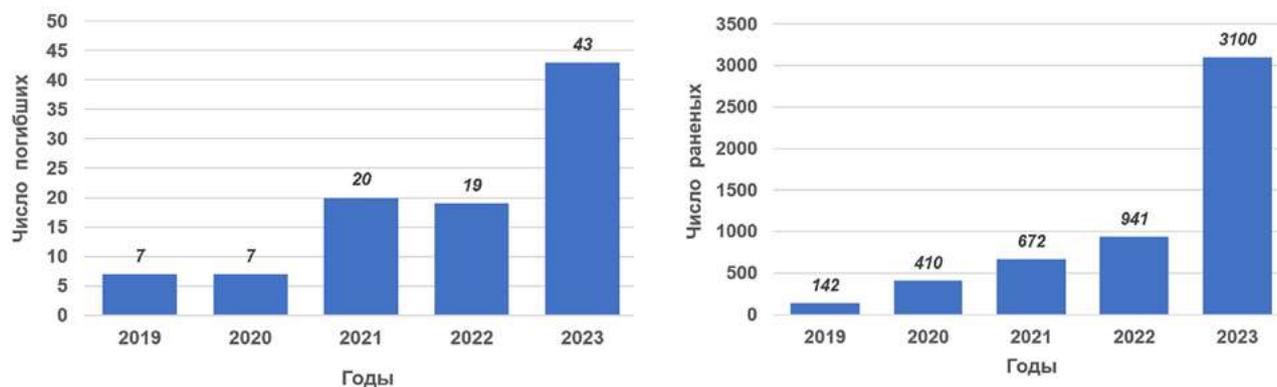


Рис. 1. Рост числа пострадавших в РФ с участием СИМ

общем росте их количества. Это свидетельствует об увеличении доли транспортных поездок (85 %) и снижении доли рекреационных поездок (15 %) граждан [2].

Поскольку соответствующая инфраструктура почти всегда отсутствует или недостаточно развита, то чаще всего пользователи электросамокатов вынуждены перемещаться по автомобильным дорогам общего пользования, по велодорожкам, но главным образом по тротуарам, где отсутствует риск столкновения с транспортными средствами. Но при этом многократно возрастают риски получения серьезных травм обычными пешеходами. А поскольку пользуются электросамокатами чаще всего молодые люди, часто не соблюдающие элементарных требований безопасности, то количество пострадавших при наездах электросамокатов пешеходов, да и самих пользователей электросамокатами в столкновениях с транспортными средствами, ежегодно растет.

Предполагается, что к 2026 году количество поездок на электросамокатах в РФ приблизится к 500 млн. Резкий рост количества поездок зафиксирован в крупных городах. Например, в Москве количество поездок на электросамокатах с 2018 по 2023 год увеличилось в 640 раз. Очевидно, что такой рост отражается и на травматизме.

По данным научного центра по безопасности движения МВД РФ [3], с 2019 по 2023 год травматизм при поездках на электросамокатах вырос

более чем в 21 раз, смертельный — более чем в 6 раз (рис. 1).

Чаще всего на улицах городов встречаются электросамокаты, принадлежащие кикшеринговым компаниям. Тем не менее в 2023 году их доля в дорожно-транспортных происшествиях практически одинакова с долей электросамокатов, принадлежащих частным лицам (соответственно 51,5 и 47,3 %). Среди ДТП со смертельным исходом 24 электросамоката принадлежали частному лицу, 19 — хозяйствующему субъекту. Основным фактором летальных исходов (79 % случаев) являлся наезд транспортных средств [3]. Обратим внимание, что речь идет именно о ДТП, а не о наездах на пешеходов.

Более половины пострадавших в ДТП — лица в возрасте до 24 лет. Четверть (25,2 %) — лица до 15 лет (рис. 2)

Анализ данных (рис. 3) показывает, что наибольшее число ДТП с участием электросамокатов приходится на пешеходные переходы, как регулируемые, так и нерегулируемые (32,7 %), тротуары, пешеходные дорожки и пешеходные зоны (26,1 %) [3].

Поскольку пользователи электросамокатов при движении стоят на прямых ногах, то при аварии с падением (без участия транспортного средства), по медицинской статистике, чаще всего травмируются верхние конечности (перелом плечевой кости, отрыв бугорка плечевой кости,

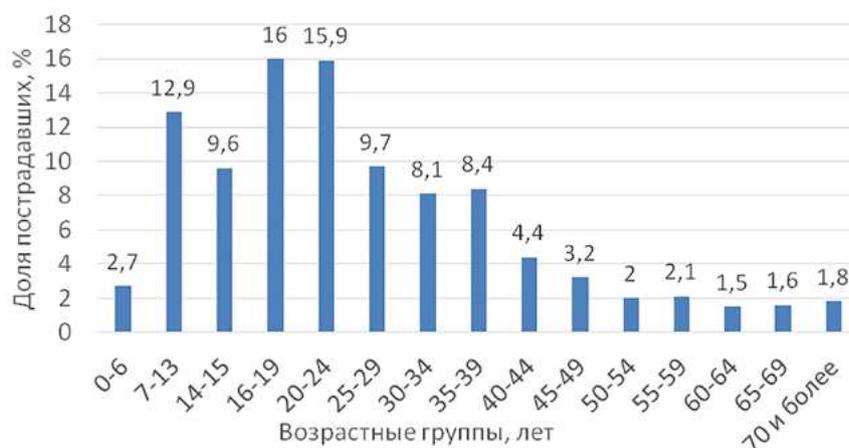


Рис. 2. Распределение удельного веса пострадавших в ДТП с участием СИМ по возрастным группам

перелом ключицы, вывих или разрыв акромиально-ключичной связки, перелом лучевой кости в месте лучезапястного сустава). Падения на колени приводят к повреждению передней крестообразной связки и переломам надколенника [4]. К летальному исходу чаще всего приводят повреждения головного мозга.

Правила пользования электросамокатами за рубежом

Практика административно-правового регулирования эксплуатации средств индивидуальной мобильности, в том числе электросамокатов, в России не успевает за стремительным вхождением электросамокатов в нашу жизнь. Прежде чем заполнить улицы российских городов, электросамокаты стали массово применяться в европейских странах, в США, в Японии, где в настоящее время выработались основные принципы обеспечения безопасности при использовании таких средств передвижения.

Рассмотрим практику регулирования данного вопроса за рубежом.

Требования к использованию электросамокатов во Франции

Самое радикальное решение было принято в результате референдума в Париже, где 89 % при-

нявших участие в плебисците проголосовали в пользу запрета использования кикшеринговых электросамокатов [5]. Запрет начал действовать с 1 сентября 2023 года, но не коснулся личных электросамокатов. Хотя требования к использованию электросамокатов в Париже и до этого были достаточно жесткими (скорость передвижения ограничивалась до 10 км/ч).

В целом по Франции правила запрещают ездить на электросамокатах по тротуарам, а в разрешенных местах устанавливают максимальную скорость движения 25 км/ч. Необходимость получения лицензии не включена во французское законодательство и люди могут ездить на электросамокатах без водительских прав так же, как и велосипедисты. Возраст пользователей электросамокатов должен быть не менее 14 лет. На электросамокате можно передвигаться только одному, нельзя использовать наушники, а также передвигаться с телефоном в руке. Собственник электросамоката при его использовании должен как минимум застраховать гражданскую ответственность, а полный страховой пакет включает страхование пользователя от несчастных случаев.

Для нарушителей правил предусмотрены серьезные наказания. Так, за несоблюдение правил дорожного движения или перевозку пассажира на электросамокате, а также езду по троту-

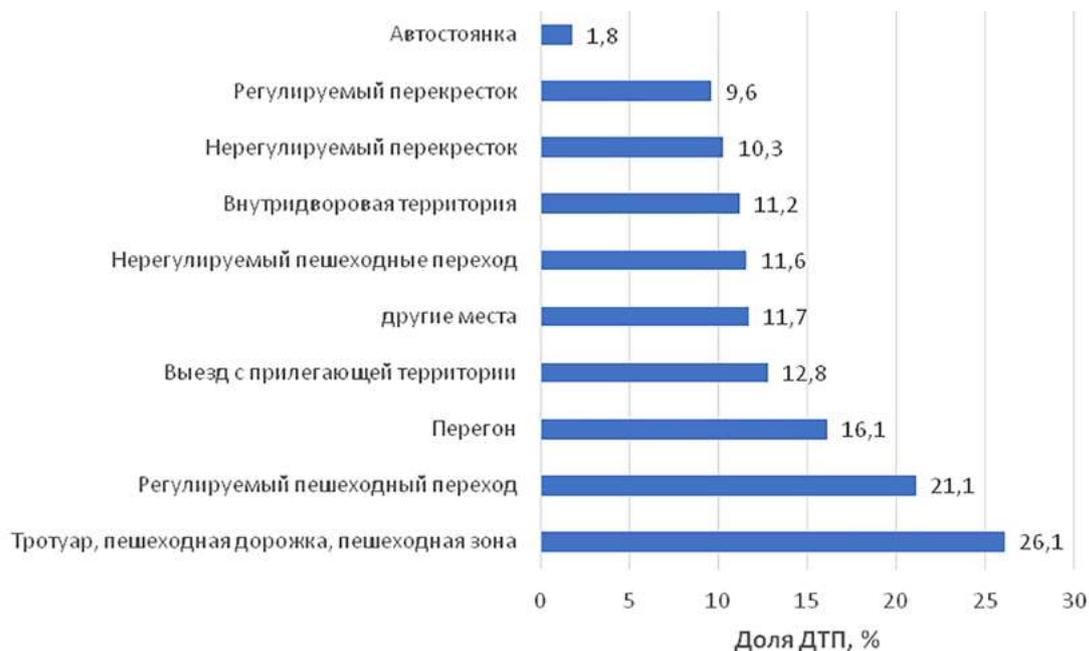


Рис. 3. Удельный вес ДТП с участием электросамокатов в зависимости от места происшествия

ару без разрешения муниципалитета — штраф 135 евро. За превышение максимально разрешенной скорости в 25 км/ч — штраф в размере 1500 евро. При отсутствии страховки гражданской ответственности специального договора — штраф в размере 3750 евро [6].

Практика использования электросамокатов в Германии

В Германии [7, 8] для вождения электросамоката, скорость которого превышает 6 км/ч, обязательным является наличие страхования гражданской ответственности. Страховку можно получить только при наличии водительских прав. Цвет номерных знаков для электросамокатов каждый календарный год изменяется. Номерной знак должен быть прикреплен на видном месте. Вождение без действующей страховки является уголовным преступлением и наказывается штрафом до 180-дневных ставок или лишением свободы на срок до 1 года.

Ношение шлема в Германии при возможности движения на электросамокате со скоростью более 20 км/ч является обязательным, при мак-

симальной скорости электросамоката до 20 км/ч ношение шлема рекомендуется.

Условия пользования электросамокатами в Польше

В Польше [9, 10] рост травматизма при использовании электросамокатов заставил государство пересмотреть правила их использования. Теперь пользователи электросамокатов смогут ездить по велосипедным дорожкам, хотя ранее им это не разрешалось. В местах, где велодорожки отсутствуют, а допустимая скорость на дорогах превышает 30 км/ч, пользователи электросамокатов могут выезжать на тротуары. Но на тротуарах скорость движения электросамокатов должна быть на уровне скорости движения пешеходов (точное значение скорости не оговаривается), пешеходы при перемещении имеют приоритет. В целом скорость электросамокатов не должна превышать 20 км/ч.

Пользователи в возрасте от десяти до 18 лет должны иметь водительские права или велосипедную карту. Страхование гражданской ответственности не является обязательным, как и

ношение шлема. Но вводится большое количество штрафов: за разговор по телефону во время движения, за перемещение на самокате более одного человека, за нарушение правил пользования тротуаром, за слишком быстрое движение по тротуару, за отказ уступить дорогу пешеходам и препятствование движению пешеходов. Также штрафом наказывается неиспользование велосипедной дорожки, если она обозначена.

Ограничения на использование электросамокатов в Южной Корее

Резкий рост смертельного травматизма в Южной Корее при использовании электросамокатов заставил южнокорейское дорожное управление начать в 2022 году исследование для разработки новых требований безопасности. После введения в действие новых требований безопасности запрещена езда на электросамокате по тротуару. Водители как минимум должны иметь права на управление мотоциклом, ношение шлема является обязательным, минимальный возраст составляет 16 лет.

Наблюдение за соблюдением правил производится не только полицейскими и видеорекамерами, но и по материалам Интернета. Например, английского футболиста Лингарда, выступающего за корейский футбольный клуб, оштрафовали за вождение самоката без шлема, превышение допустимого количества пассажиров и другие нарушения на основании видео, которое он сам опубликовал в социальных сетях [11, 12].

Правила эксплуатации электросамокатов в США

В США требования к пользователям электросамокатов неодинаковы в различных штатах. Но в большинстве случаев требования такие же, как и к велосипедам, в отношении которых действует закон о велосипедах в Соединенных Штатах [13].

В некоторых штатах (Массачусетс, Калифорния) для передвижения на электросамокатах тре-

буется наличие водительских или ученических прав. Но в большинстве штатов данное требование не является обязательным.

Возрастные ограничения для водителей электросамокатов различаются в зависимости от штата, но общий минимальный возраст составляет 16 лет. В некоторых штатах, таких как Небраска и Теннесси, минимальный возраст для водителей электросамокатов составляет 17 и 18 лет соответственно, а в Нью-Джерси минимальный возраст водителя электросамоката — 15 лет [13].

Основным средством обеспечения безопасности пользователей электросамокатов являются шлемы. Они являются обязательными в 10 штатах, в основном для водителей до 18 лет.

Езда по тротуарам полностью запрещена во многих штатах (Калифорния, Нью-Йорк, Флорида, Джорджия, Огайо, Индиана, Колорадо), в ряде штатов разрешается ездить по тротуарам с ограничением скорости.

Движение на электросамокате по проезжей части запрещается, если разрешенная скорость транспортных средств превышает 25–35 миль в час (в зависимости от штата).

В некоторых городах, например в Лос-Анжелесе, для поворота налево на электросамокате водителю необходимо спешиться и перейти дорогу пешком, чтобы избежать аварий.

Использование электросамокатов в Финляндии

В Финляндии опросы общественного мнения показали, что почти 70 % респондентов считают электросамокаты значительной угрозой для безопасности пешеходов. Мнение финнов учли в новых правилах дорожного движения, в соответствии с которыми допустимая скорость будет снижена с 25 до 15 километров в час. По этим причинам хельсинкские прокатные компании Voi, TIER и Lime объявили, что они ограничат скорость движения электросамокатов в городе [14].

Пункт ПДД	Требование Правил к движению лиц в возрасте старше 14 лет, использующих для передвижения средства индивидуальной мобильности (СИМ)	
24.1	Движение <i>должно</i> осуществляться по велосипедной, велопешеходной дорожкам, проезжей части велосипедной зоны или полосе для велосипедистов.	
24.2	<i>Допускается:</i>	
	1) В пешеходной зоне	Если масса СИМ не превышает 35 кг
	2) По тротуару, пешеходной дорожке	а) Если масса СИМ не превышает 35 кг б) Если отсутствуют велосипедная и велопешеходная дорожки, полоса для велосипедистов либо отсутствует возможность двигаться по ним или лицо, использующее для передвижения СИМ, сопровождает ребенка в возрасте до 14 лет, использующего СИМ или велосипед
	3) По обочине	Если отсутствуют велосипедная и велопешеходная дорожки, полоса для велосипедистов, тротуар, пешеходная дорожка либо отсутствует возможность двигаться по ним
4) По правому краю проезжей части дороги	При соблюдении одновременно следующих условий: а) отсутствуют велосипедная и велопешеходная дорожки, полоса для велосипедистов, тротуар, пешеходная дорожка, обочина либо отсутствует возможность двигаться по ним и б) на дороге разрешено движение транспортных средств со скоростью не более 60 км/ч, а также движение велосипедов; и в) СИМ оборудовано тормозной системой, звуковым сигналом, световозвращателями белого цвета спереди, оранжевого или красного цвета с боковых сторон, красного цвета сзади, фарой (фонарем) белого цвета спереди.	
24.6	а) Движение разрешается со скоростью не более 25 км/ч	
	б) Если при движении по тротуару, пешеходной дорожке, обочине или в пределах пешеходных зон (включая велосипедные дорожки, находящиеся в пешеходных зонах) подвергаются опасности пешеходы или создаются помехи для их движения, то лицо, использующее СИМ, должно спешиться или снизить скорость до скорости, не превышающей скорость движения пешеходов	
	в) Во всех случаях совмещенного с пешеходами движения велосипедистов и лиц, использующих для передвижения СИМ, пешеходы имеют приоритет	

Рис. 4. Основные требования к движению лиц, использующих электросамокаты (СИМ)

Основные требования правил дорожного движения для лиц, использующих средства индивидуальной мобильности, и их ответственность за нарушения

В России требования к движению лиц, использующих для передвижения средства индивидуальной мобильности, регулируются постановлением правительства № 1090 «О правилах

дорожного движения» (редакция от 19.04.2024) [1]. Основные положения из правил в сжатом виде приведены на рис. 4.

Другим важным документом, принятым в октябре 2023 года Правительством РФ, является дорожная карта «Мероприятий, направленных на дополнительное нормативно-правовое регулирование развития СИМ и обеспечение дорож-

ного движения при их использовании» [15]. Она состоит из 27 пунктов, рассчитанных до 2025 года. Главное внимание в данном документе уделено созданию и интеграции инфраструктуры для СИМ, в том числе для электросамокатов в городские транспортные системы, а также создание реестра пользователей.

Ответственность пользователей отражена в статье 12.29 «Кодекса об административных правонарушениях», согласно которой «Нарушение ПДД пешеходом или иным лицом, участвующим в процессе дорожного движения», в соответствии с которой нарушитель наказывается штрафом 800 руб. или 1,5 тыс. руб., если нарушение совершено в пьяном виде [16]. Это действующая норма, но она еще может поменяться в рамках нового КоАП, над которым работает Минюст. То есть возникает правовая коллизия, где с точки зрения ПДД электросамокаты являются транспортными средствами, с точки зрения кодекса об административных правонарушениях они таковыми не являются. А многие граждане считают, что ответственность за противоправные действия пользователей самокатов является практически условной.

Анализ данных документов показывает, что все проблемы безопасности с использованием электросамокатов в ближайшее время решить не представляется возможным по причине отсутствия в ПДД целого ряда необходимых, на наш взгляд, требований.

Например, указания о тех случаях, когда необходим полный запрет на движение СИМ, были бы особенно актуальны для Санкт-Петербурга и многих других городов с застройкой XVII–XIX веков, когда ширина тротуаров с трудом позволяет разминуться даже пешеходам. Поэтому местным органам исполнительной власти приходится принимать решения самим. Так, в Санкт-Петербурге в 2024 году максимальная скорость движения электросамокатов более чем в 150 локациях огра-

ничена до 15 км/ч, в семи зонах — до 10 км/ч. Запрещена езда в 31 локациях, куда входят, в частности, 13 локаций Кронштадта, Петергофа, Сестрорецка. Соответствующую инфраструктуру, особенно в центрах крупных старинных городов, невозможно создать в обозримое время.

Исходя из проведенного анализа опыта зарубежных стран, документов, регламентирующих практику пользования электросамокатов в РФ, для повышения безопасности пользователей электросамокатов и пешеходов предлагается ряд мер:

1. Отобразить в ПДД РФ требование об обязательном ношении защитных шлемов при использовании частных электросамокатов лицам в возрасте до 18 лет, рекомендовать использование защитных шлемов лицам старше этого возраста.
2. Установить в ПДД РФ минимальный возраст использования электросамокатов в 16 лет.
3. Разрешить использование электросамокатов только при наличии водительского удостоверения любой категории или после прохождения организованных курсов с последующей сдачей экзамена.
4. Обязать кикшеринговые компании в обязательном порядке ввести в стоимость аренды электросамокатов страхование гражданской ответственности лиц, арендующих электросамокат.
5. Разрешить частным лицам использование электросамокатов только при наличии полиса гражданской ответственности.
6. Ввести требование по эксплуатации электросамокатов только после постановки на учет и установки номерного знака на электросамокат.
7. В КоАП прописать ответственность пользователей электросамокатов за превышение разрешенной скорости, ездю в запрещенных локациях, отсутствие номерных знаков, отсутствие страхового полиса и средств защиты, одновременную ездю на электросамокате нескольких лиц.
8. Законодательно установить критерии, по которым должен вводиться запрет на передвижение электросамокатов по тротуарам и пешеходной зоне.

Список источников

1. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 (ред. от 19.04.2024) «О Правилах дорожного движения» (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения») // КонсультантПлюс. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (дата обращения: 18.06.2024).

2. Исследование рынка шеринга электросамокатов в России в 2023 году // ICT.Moscow. — URL: <https://ict.moscow/research/issledovanie-rynka-sheringa-elektrosamokatov-v-rossii-v-2023-godu/> (дата обращения: 24.06.2024).

3. Баканов К. С. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2023 году. Информационно-аналитический обзор / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, А. С. Айсанов и др. — М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2024. — 154 с.

4. Набаткина К. Начали с наездов: побьет ли новый сезон самокатов рекорд травматичности / К. Набаткина, С. Прохорчук // Известия. — URL: <https://iz.ru/1681583/kseniia-nabatkina-sofiia-prokhorchuk/nachali-s-naezdov-pobet-li-novyi-sezon-samokatov-rekord-travmatichnosti> (дата обращения: 15.07.2024).

5. Avez-vous besoin d'un permis de conduire pour utiliser une trottinette électrique en France? — URL: <https://unagis-cooters.com/fr/scooter-articles/do-you-need-a-license-to-ride-an-electric-scooter-in-france/> (дата обращения: 15.07.2024).

6. Réglementation trottinette électrique pour circuler en toute sécurité. — URL: <https://assurance.carrefour.fr/assurance-trottinette-electrique-nvei/questions-et-actualites/trottinettes-electriques-conseils-securite> (дата обращения: 18.07.2024).

7. Electric scooters in Germany. — URL: <https://finber.de/en/e-scooter/> (дата обращения: 20.07.2024).

8. E-Scooter: road legal in Germany — all the info. — URL: <https://technical-tips.com/blog/hardware/escooter-road-legal-in-germany-12421> (дата обращения: 01.08.2024).

9. Polish government to regulate electric scooters amid safety concerns. — URL: <https://notesfrompoland.com/2021/02/03/polish-government-to-introduce-electric-scooters-rules-amid-safety-concerns/> (дата обращения: 02.09.2024).

10. Правила дорожного движения на электросамокатах, скейтах и роликах в Польше. — URL: <https://poland-consult.com/novosti/pdd-samokatov.html> poland-consult.com (дата обращения: 03.09.2024).

11. Kim B. Korea begins research on safety guidelines on e-scooters / B. Kim. — URL: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20220815002400315> (дата обращения: 10.09.2024).

12. Ko Jun-tae. Driver's licence to be required for electric scooter users / Ko Jun-tae. — URL: <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210511000713> (дата обращения: 22.09.2024).

13. Electric Scooter Laws 2024: What You Need To Know About Regulations By State. — URL: <https://apolloscooters.co/blogs/news/electric-scooter-laws-2024-what-you-need-to-know-about-regulations-by-state> (дата обращения: 10.10.2024).

14. Finnish researchers say e-scooter riders more likely to be injured than pedestrians, cyclists and motorcycle riders. — URL: <https://etsc.eu/finnish-researchers-say-e-scooter-riders-more-likely-to-be-injured-than-pedestrians-cyclists-and-motorcycle-riders/> (дата обращения: 10.10.2024).

15. «План мероприятий («Дорожная карта»), направленных на дополнительное нормативно-правовое регулирование развития средств индивидуальной мобильности и обеспечение безопасности дорожного движения при их использовании» (утв. Правительством РФ 11.10.2023 № 11752-П50-МХ) // Кодексы и законы. Правовая навигационная система. — URL: <https://www.zakonrf.info/plan-pravitelstvo-rf-11752-p50-mkh-11102023/> (дата обращения: 18.10.2024).

16. Штрафы ГИБДД для средств индивидуальной мобильности. — URL: <https://pddmaster.ru/shtraf/dlya-sim.html> (дата обращения: 18.10.2024).

Дата поступления: 08.12.2024

Решение о публикации: 02.02.2025

Контактная информация:

КАНОНИН Юрий Николаевич — канд. техн. наук, доц.;
yu.n.kanonin@yandex.ru

ТИХОМИРОВ Олег Игоревич — канд. техн. наук, доц.;
ot-ntb@mail.ru

Reducing the Risk of Injury from Electric Scooters

Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I. Reducing the Risk of Injury from Electric Scooters // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 186–195. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-186-195

Summary

Purpose: To determine major causes of accidents from electric scooters, to evaluate foreign and domestic practices in injury prevention, to propose measures to reduce risks for pedestrians and users of electric scooters.

Methods: Analysis of statistical data on injuries with pedestrians and E-scooters users in road accidents with an assessment of the nature and severity of injuries. Analysis of administrative and practical methods used in foreign countries to reduce injury risks. **Practical significance:** An assessment of methods for reducing injuries from electric scooters existing in Russia and other countries has been carried out and measures for preventing injury risks from personal mobility devices have been proposed.

Keywords: Personal mobility devices, electric scooters (E-scooters), injuries, risk of injury, road accidents.

References

1. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23.10.1993 № 1090 (red. ot 19.04.2024) "O Pravilakh dorozhnogo dvizheniya" (vmeste s "Osnovnymi polozheniyami po dopusku transportnykh sredstv k ekspluatatsii i obyazannosti dolzhnostnykh lits po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya")* [Resolution of the Government of the Russian Federation of 23.10.1993 № 1090 (as amended on 19.04.2024) "On the Rules of the Road" (together with the "Basic Provisions for the Admission of Vehicles to Operation and the Duties of Officials to Ensure Road Safety")]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/ (accessed: June 18, 2024). (In Russian)
2. *Issledovanie rynka sheringa elektrosamokatov v Rossii v 2023 godu* [Research of the electric scooter sharing market in Russia in 2023]. ICT.Moscow. Available at: <https://ict.moscow/research/issledovanie-rynka-sheringa-elektrosamokatov-v-rossii-v-2023-godu/> (accessed: June 24, 2024). (In Russian)
3. Bakanov K. S., Lyakhov P. V., Aysanov A. S. et al. *Dorozhno-transportnaya avariynost' v Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu. Informatsionno-analiticheskiy obzor* [Road traffic accidents in the Russian Federation in 2023. Information and analytical review]. Moscow: FKU "NTs BDD MVD Rossii" Publ., 2024, 154 p. (In Russian)
4. Nabatkina K., Prokhorchuk S. *Nachali s naezdov: pob'et li novyy sezon samokatov rekord travmatichnosti* [They started with collisions: will the new scooter season break the injury record]. *Izvestiya* [News]. Available at: <https://iz.ru/1681583/kseniia-nabatkina-sofiia-prokhorchuk/nachali-s-naezdov-pobet-li-novyi-sezon-samokatov-rekord-travmatichnosti> (accessed: July 15, 2024). (In Russian)
5. *Avez-vous besoin d'un permis de conduire pour utiliser une trottinette électrique en France?* Available at: <https://unagiscooters.com/fr/scooter-articles/do-you-need-a-license-to-ride-an-electric-scooter-in-france/> (accessed: July 15, 2024).
6. *Réglementation trottinette électrique pour circuler en toute sécurité.* Available at: <https://assurance.carrefour.fr/>

assurance-trottinette-electrique-nvei/questions-et-actualites/trottinettes-electriques-conseils-securite (accessed: July 18, 2024).

7. Electric scooters in Germany. Available at: <https://finber.de/en/e-scooter/> (accessed: July 20, 2024).

8. E-Scooter: road legal in Germany — all the info. Available at: <https://technical-tips.com/blog/hardware/escooter-road-legal-in-germany-12421> (accessed: August 1, 2024).

9. Polish government to regulate electric scooters amid safety concerns. Available at: <https://notesfrompoland.com/2021/02/03/polish-government-to-introduce-electric-scooters-rules-amid-safety-concerns/> (accessed: September 2, 2024).

10. *Pravila dorozhnogo dvizheniya na elektrosamokatakh, skeytakh i rolkakh v Pol'she* [Traffic rules for electric scooters, skateboards and roller skates in Poland]. Available at: <https://poland-consult.com/novosti/pdd-samokatov.html> poland-consult.com (accessed: September 3, 2024). (In Russian)

11. Kim B. Korea begins research on safety guidelines on e-scooters. Available at: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20220815002400315> (accessed: September 10, 2024).

12. Ko Jun-tae. Driver's licence to be required for electric scooter users. Available at: <https://www.koreaherald.com/view.php?ud=20210511000713> (accessed: September 22, 2024).

13. Electric Scooter Laws 2024: What You Need To Know About Regulations By State. Available at: <https://apolloscooters.co/blogs/news/electric-scooter-laws-2024-what-you-need-to-know-about-regulations-by-state> (accessed: October 10, 2024).

14. Finnish researchers say e-scooter riders more likely to be injured than pedestrians, cyclists and motorcycle riders. Available at: <https://etsc.eu/finnish-researchers-say-e-scooter-riders-more-likely-to-be-injured-than-pedestrians-cyclists-and-motorcycle-riders/> (accessed: October 10, 2024).

15. “Plan meropriyatiy (“Dorozhnaya karta”), napravlenykh na dopolnitel'noe normativno-pravovoe regulirovanie razvitiya sredstv individual'noy mobil'nosti i obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya pri ikh ispol'zovanii” (utv. Pravitel'stvom RF 11.10.2023 № 11752-P50-MKh) [“Action plan (“Roadmap”) aimed at additional legal regulation of the development of personal mobility vehicles and ensuring road safety when using them” (approved by the Government of the Russian Federation on 11.10.2023 № 11752-P50-MX)]. *Kodeksy i zakony. Pravovaya navigatsionnaya Sistema* [Codes and laws. Legal navigation system]. Available at: <https://www.zakonrf.info/plan-pravitelstvo-rf-11752-p50-mkh-11102023/> (accessed: October 18, 2024). (In Russian)

16. *Shtrafy GIBDD dlya sredstv individual'noy mobil'nosti* [Traffic police fines for personal mobility vehicles]. Available at: <https://pddmaster.ru/shtraf/dlya-sim.html> (accessed: October 18, 2024). (In Russian)

Received: December 08, 2024

Accepted: February 02, 2025

Author's information:

Yuriy N. KANONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yu.n.kanonin@yandex.ru

Oleg I. TIKHOMIROV — PhD in Engineering, Associate Professor; ot-ntb@mail.ru

УДК 624.21.055:693.5

Алгоритм математической модели для оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений

У. З. Шермухамедов¹, А. А. Белый^{1,2}, М. М. Собирова¹, Ш. Ш. Кадилова¹

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100167, г. Ташкент, Темирий-улчиляр, 1

²ООО «К2 Инжиниринг», Российская Федерация, 123290, Москва, ул. Горбунова, 2, стр. 3

Для цитирования: Шермухамедов У. З., Белый А. А., Собирова М. М., Кадилова Ш. Ш. Алгоритм математической модели для оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 196–205. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-196-205

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос алгоритма математической модели для оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений на основе критериев оценки технико-эксплуатационных показателей. Исследование необходимости и разработка математической модели прогнозирования технического состояния мостовых сооружений, позволяющего поддерживать надежность и функциональность объектов мостового парка города Ташкента на требуемом уровне. **Методы:** Метод анализа иерархии дал возможность оптимально выразить данное выражение. Приведенный метод служит инструментом при решении задачи путем подбора наилучшего варианта из нескольких существующих. Данный метод позволяет определить порядки реализации инвестиционных проектов в зависимости от их актуальности. Весовые коэффициенты критериев рассчитывались в Mrpriority 1.0. **Результаты:** В результате исследований выяснилось, что путепровод, расположенный на пересечении улиц Гавхар и Бунедкор в городе Ташкенте, функционирует в неудовлетворительном состоянии. На основании этого было установлено, что срок службы данного сооружения составляет 35–38 лет исходя из параметрических условий функции $W(t)$. **Практическая значимость:** С каждым годом в городах растет количество дорог и транспортных средств, что приводит к увеличению их загруженности. Определение соответствующих уровней путем оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений, соответственно, позволило спрогнозировать срок службы и спланировать вид работ до достижения заданного уровня. Таким образом, разработанная с учетом конкретных условий города Ташкента математическая модель оценки и прогнозирования технического состояния действующих железобетонных мостов и путепроводов позволяет поддерживать необходимый уровень надежности и функциональности мостового парка города.

Ключевые слова: Критерии оценки, мосты, метод иерархического анализа, безопасность и комфортность движения, долговечность, грузоподъемность, пропускная способность, ремонтпригодность.

Введение

В настоящее время ведутся научно-исследовательские работы по оценке и прогнозированию несущей способности автодорожных железобетонных мостов, их технического и эксплуатационного состояния, созданию технологий инфор-

мационного моделирования и систем активного мониторинга, а также повышению экологической безопасности и долговечности сооружений в крупных мегаполисах мира. В данном направлении актуальной задачей является проведение теоретических и экспериментальных исследова-

ний по созданию инновационной системы «Цифровой мониторинг моста» и прогнозированию срока службы при оценке технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений.

С каждым годом в городах растет количество дорог и транспортных средств, что приводит к увеличению их загруженности. Таким образом, возникает необходимость в системе транспортных сооружений, включающей в себя путепроводы, мосты и тоннели. Основной задачей искусственных сооружений является образование единой сети улиц и дорог, оптимизация транспортных связей между территориями, отделенными друг от друга естественными или искусственными препятствиями, а также уменьшение времени движения транспортных средств.

На сегодняшний день город Ташкент претерпевает глобальные изменения, превращаясь в один из крупных мегаполисов мира, что неизбежно привело к увеличению скорости движения и транспортного потока в 2–3 раза, по улицам города в день передвигается более 700–800 тысяч транспортных средств. В настоящий момент недостаточно изучено техническое и эксплуатационное состояние действующих железобетонных мостовых сооружений города Ташкента. В результате анализа особенностей мониторинга установлено, что в нашей стране проведено недостаточное исследование параметров активного мониторинга, тогда как в зарубежных странах данной проблеме уделяется достаточно внимания [1].

Постановка задачи

В целях совершенствования метода оценки и прогнозирования технического состояния городских мостовых сооружений авторами изучена общая информация о них, а также были проведены визуальные обследования более 30 мостов и путепроводов города Ташкента в зависимости от их различных параметров, в результате чего

были выявлены дефекты и повреждения. При оценке технического состояния мостовых сооружений были предложены следующие технико-эксплуатационные показатели: «безопасность и комфортность движения», «долговечность», «грузоподъемность», «пропускная способность» и «ремонтпригодность». Изучены факторы, а также дефекты и повреждения, влияющие на конструкции моста, на основании чего была произведена оценка конструкций по приведенным выше технико-эксплуатационным показателям (рис. 1) [2].

Для эффективного управления техническим состоянием железобетонных мостовых сооружений научный интерес представляет не только знание фактического состояния сооружений в период исследования, но и будущие изменения, то есть и его прогноз. Создание метода прогнозирования срока службы мостовых сооружений позволяет поддерживать надежность и функциональность объектов мостового парка города Ташкента на требуемом уровне [3–8].

Прогнозирование срока службы сооружений является временным понятием, а единственным предложенным временным критерием служит технико-эксплуатационный показатель «долговечность». Нормативные сроки службы некоторых элементов железобетонных мостовых сооружений на автомобильных дорогах нигде четко не регламентированы и не нормированы. Ученые [9–12] представили различные версии взглядов на эти периоды исходя из собственного подхода к оценке срока службы мостовых сооружений в эксплуатации и своих точек зрения.

Создание математической модели объекта является важнейшим этапом расчета объектов транспортной инфраструктуры. Если математическая модель неверна (неадекватна), то найденное решение приведет к неправильной интерпретации процессов оценки мостовых сооружений [13, 14].



Рис. 1. Основные технико-эксплуатационные показатели

Таблица 1. Весовые коэффициенты технических и эксплуатационных показателей

ТЭП	Обозначение	Весовой коэффициент
Грузоподъемность	Г	0,51
Пропускная способность	П	0,264
Долговечность	Д	0,13
Безопасность и комфортность движения	Б	0,063
Ремонтопригодность	Р	0,033
	Σ	1,000

Прежде чем выбрать расчетную модель мостового сооружения, необходимо проанализировать основные факторы, существенно влияющие на состояние объекта.

Как отмечалось выше, в обобщенный количественный показатель входит несколько рекомендуемых ТЭП, которые ранжируются по значимости, грузоподъемности, пропускной способности, долговечности, безопасности и комфортности движения, а также ремонтпригодности. Весовые коэффициенты критериев неодинаковы и могут быть выражены путем одновременного выполне-

ния следующих математических условий (они же выступают критерием оптимальности решения):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^5 k_i &= 1,000 \\ k_{i+1} &= k_i \cdot n \\ n &\rightarrow \min \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где k_i — критерий оценки технического состояния; n — натуральное число, $n > 1$.

Вычисляются результаты для оптимального решения $n = 2$ (табл. 1).

Метод анализа иерархии (МАИ) дал возможность оптимально выразить данное выражение. Приведенный метод служит инструментом при решении задачи путем подбора наилучшего варианта из нескольких существующих.

Данный метод позволяет определить порядки реализации инвестиционных проектов в зависимости от их актуальности. МАИ включает в себя следующие этапы:

- описание проблемы в виде иерархии;
- установление приоритетов в зависимости от критериев;

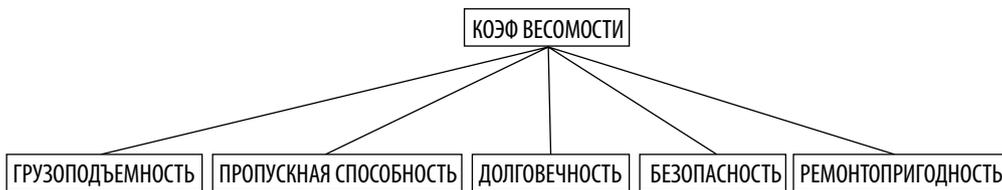


Рис. 2. Описание задачи в виде иерархии

- определение приоритетов альтернатив (решений) по каждому критерию;
- определение глобальных приоритетов.

В целях расчета весовых критериев в системе оценки авторами была подобрана программа MPriority 1.0 (рис. 2).

Для того чтобы определить весовой коэффициент Y , были введены уровни значимости каждого критерия (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что если соотношение совместимости — значение ОС находится в пределах 10–20 %, то это значит, что при заполнении приведенной таблицы избегается наличие существенных противоречий. В противном случае нам нужно повторить процесс заполнения таблицы. Принимаем полученные коэффициенты, поскольку $OS = 5,29\%$ (рис. 4).

Таким образом, исходя из рис. 4 и приведенного выше выражения а также программы получаем следующую таблицу (табл. 1).

Приведенная ниже формула позволяет рассчитать основной коэффициент ТЭП (критерий оценки):

$$K_i^k = (K_i^{baz})^{\frac{1}{(6-k)}}, \tag{2}$$

где k — категория дефекта;

K_i^{baz} — базовый расчетный коэффициент.

Результаты расчета по приведенным выше формулам (1) и (2) позволяют создать матрицу коэффициентов важности ТЭП (табл. 2).

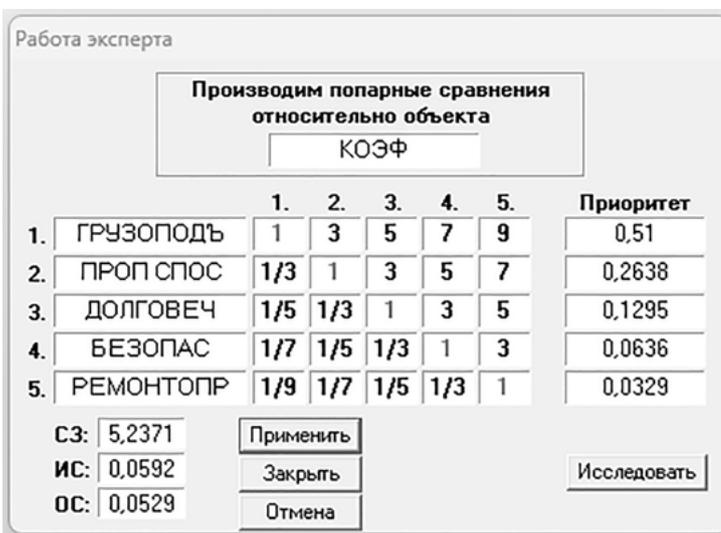


Рис. 3. Определение приоритета критериев



Рис. 4. Определение глобальных приоритетов

Исходя из этого, видно, что каждый критерий имеет коэффициенты важности относительно друг друга (рис. 5).

Общий уровень технического состояния каждого пролета (обобщенный показатель) определяется по следующей формуле:

Таблица 2. Матрица коэффициентов значимости технического состояния ТЭП (критериев оценки)

Категория, k	Г	П	Д	Б	Р	y_j	
Г	5	0,51	0,264	0,13	0,063	0,033	$y_{\Gamma} = 0,534$ $y_{\Delta} = 0,267$ $y_{\text{Б}} = 0,133$ $y_{\text{Р}} = 0,066$
	4	0,719	0,150	0,075	0,037	0,019	
	3	0,803	0,105	0,053	0,026	0,013	
	2	0,848	0,081	0,041	0,020	0,010	
	1	0,876	0,066	0,033	0,016	0,008	
П	5	0,51	0,264	0,13	0,063	0,033	$y_{\Gamma} = 0,697$ $y_{\Delta} = 0,174$ $y_{\text{Б}} = 0,086$ $y_{\text{Р}} = 0,043$
	4	0,343	0,508	0,086	0,042	0,021	
	3	0,253	0,637	0,063	0,031	0,016	
	2	0,200	0,713	0,050	0,025	0,012	
	1	0,165	0,763	0,041	0,020	0,010	
Д	5	0,51	0,264	0,13	0,063	0,033	$y_{\Gamma} = 0,594$ $y_{\text{Б}} = 0,296$ $y_{\Delta} = 0,073$ $y_{\text{Р}} = 0,037$
	4	0,380	0,190	0,359	0,047	0,024	
	3	0,294	0,147	0,505	0,036	0,018	
	2	0,238	0,119	0,599	0,029	0,015	
	1	0,199	0,100	0,664	0,025	0,012	
Б	5	0,51	0,264	0,13	0,063	0,033	$y_{\Gamma} = 0,552$ $y_{\text{Б}} = 0,276$ $y_{\Delta} = 0,138$ $y_{\text{Р}} = 0,034$
	4	0,413	0,206	0,103	0,253	0,026	
	3	0,331	0,165	0,083	0,400	0,021	
	2	0,275	0,137	0,069	0,503	0,017	
	1	0,234	0,117	0,058	0,577	0,014	
Р	5	0,51	0,264	0,13	0,063	0,033	$y_{\Gamma} = 0,534$ $y_{\text{Б}} = 0,267$ $y_{\Delta} = 0,133$ $y_{\text{Б}} = 0,066$
	4	0,439	0,219	0,109	0,054	0,179	
	3	0,365	0,182	0,091	0,045	0,317	
	2	0,308	0,154	0,077	0,038	0,423	
	1	0,266	0,133	0,066	0,033	0,502	

$$D_{um} = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^4 k_j^{baz} D_i K_{vazn}^i \tag{3}$$

Исходя из этого, разработано программное обеспечение для оценки технического состояния железобетонных мостовых сооружений города.

Нормативный срок службы определяется временем достижения предела физического износа. Их значения приведены для железобетонных пролетных строений в соответствующих таблицах. Функция износа соответствует функции отказа по законам теории надежности (рис. 6 и формула (3)).

$$Y_i = [e^{\lambda(T_i - T_0)} - 1] 100, \tag{4}$$

где e — натуральное число;

T_i — параметр времени (*временной параметр*) (годы);

T_0 — период запуска сооружению (*период начала функционирования*);

λ — качество конструкций после изготовления и монтажа, качество обслуживания в соответствии с принятой стратегией эксплуатации, параметр функции износа, отражающий реальные транспортные и природно-климатические условия объекта (среднестатистическое значение, полученное для каждого элемента и пролетного строения на основе результатов исследований более 200 мостов).

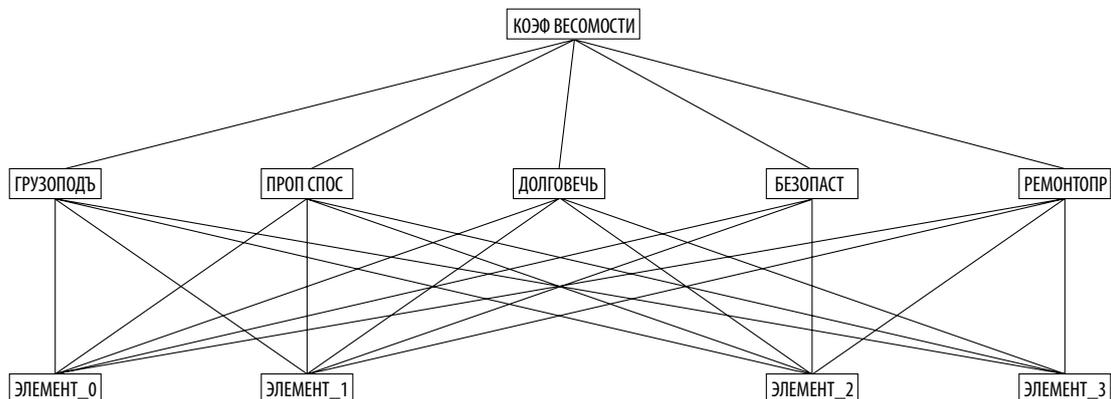


Рис. 5. Зависимость от глобальных приоритетов

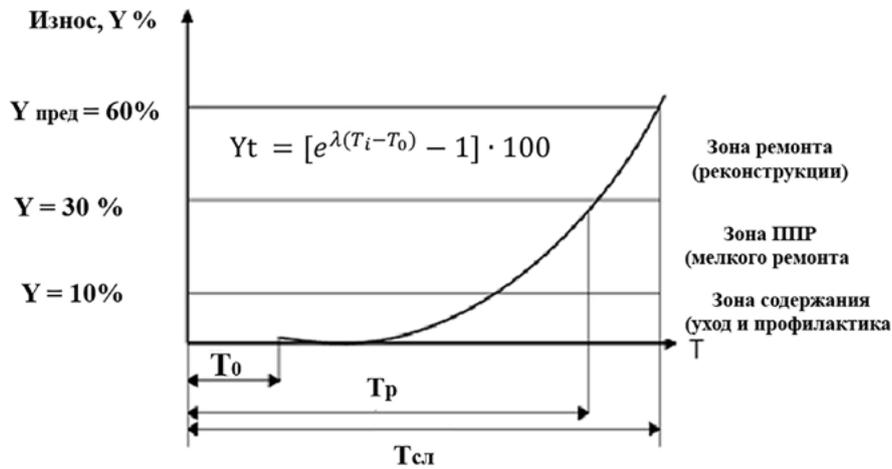


Рис. 6. Функция износа

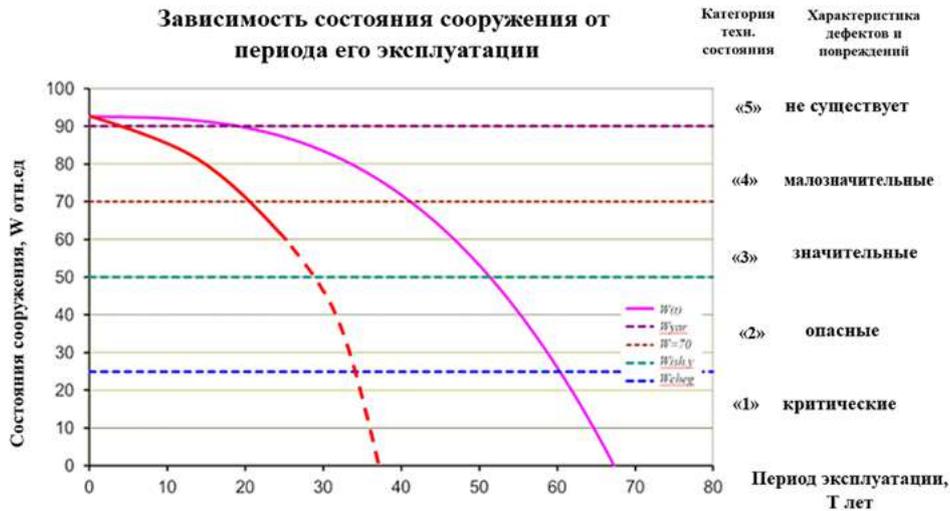


Рис. 7. Параметрические условия функции $W(t)$

$$W(t) = -t^e, \tag{5}$$

где t — срок службы объекта, лет;

$W(t)$ — состояние конструкции, относительные единицы.

$W(t)$ график функции отразил фактические значения как функцию времени, выражение (5) можно преобразовать к следующему виду:

$$W(t) = W_{исх} - \alpha t^e, \tag{6}$$

где $W_{исх}$ — исходный уровень состояния сооружения, относительные единицы;
 α — коэффициент перехода к указанному порядку чисел.

Теоретически уровень $W_{исх}$ должен составлять 100 относительных единиц. Однако на самом деле это не так.

Используя принятую систему категорий от 1 до 5, можно показать связь категории технического состояния с уровнем технического состояния в относительных единицах (табл. 3).

Таблица 3. Зависимость категории дефекта (поврежденности) от уровня технического состояния W

Категория	5	4	3	2	1
W , отн. ед.	≥ 90	70–89	50–69	25–49	< 24

На основании данных, полученных из рис. 7, необходимо отметить, что за 24 года путепровод на пересечении улиц Гавхар и Бунедкор в Ташкенте оказался в *неудовлетворительном состоянии*. Исходя из параметрических условий функции $W(t)$, можно сказать, что срок его службы может составлять 35–38 лет.

Международный союз испытательных и материаловедческих лабораторий одним из своих критериев устанавливает соответствие между уменьшением параметра и вероятностью такого уменьшения.

Определение соответствующих уровней путем оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений, соответственно, позволило спрогнозировать срок службы и спланировать вид работ до достижения заданного уровня. В результате разработанная с учетом конкретных условий города Ташкента математическая модель оценки и прогнозирования технического состояния действующих железобетонных мостов и путепроводов позволяет поддерживать необходимый уровень надежности и функциональности мостового парка города.

Выводы

На основе метода анализа иерархий разработана математическая модель для оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений. При этом весовые коэффициенты технико-эксплуатационных показателей выражались путем одновременного выполнения математических условий с учетом того, что они неодинаковы. Определены их коэффициенты корреляции.

С учетом конкретных условий города Ташкента и в качестве основных критериев оценки впервые использованы основные технические параметры, такие как «**безопасность и комфортность движения**», «**долговечность**», «**грузоподъемность**», «**пропускная способность**» и «**ремонтпригодность**». Усовершенствована методика оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений в эксплуатации на основе эксплуатационных показателей (ТЭП). В результате удалось сохранить необходимый уровень надежности и функциональности парка мостовых сооружений города.

В результате исследований выяснилось, что путепровод, расположенный на пересечении улиц Гавхар и Бунедкор в городе Ташкенте, функционирует в неудовлетворительном состоянии. На основании этого было установлено, что срок службы данного сооружения составляет 35–38 лет исходя из параметрических условий функции $W(t)$.

Список источников

1. Shermukhamedov U. Z. Analysis of the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridge structures / U. Z. Shermukhamedov, M. M. Sobirova, N. F. Azamov et al. // The international scientific conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO 2022), August 23–24, 2023.
2. Шермухамедов У. З. К оценке технико-эксплуатационного состояния городских железобетонных мостов и путепроводов / У. З. Шермухамедов, А. А. Белый, М. М. Собирова и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2024. — Т. 21. — Вып. 1. — С. 238–251.
3. Белый А. А. Об эксплуатации железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Сборник материалов 61-ой Межд. науч.-техн. конф. Ч. III. — СПб.: СПбГАСУ, 2008. — С. 12–19.
4. ОДМ 218.4.001—2008.

5. Белый А. А. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород: РИЦ БГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. — № 3. — С. 37–44. — DOI: 10.12737/24624.
6. Белый А. А. Способ оценки технического состояния железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Транспортное строительство. — 2009. — № 6. — С. 10–13.
7. Вдовенко А. В. Сервис и мониторинг дорожных сооружений / А. В. Вдовенко, С. Е. Бегун, В. И. Кулиш. — Хабаровск: ХабГТУ, 2002. — 692 с.
8. Белый А. А. Методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений: дисс. ... канд. тех. наук / А. А. Белый. — М.: Московский государственный автомобильно-дорожный институт (Технический университет), 2009. — 253 с.
9. Шестериков В. И. Оценка состояния автодорожных мостов и прогнозирование его изменения с помощью показателя физического износа / В. И. Шестериков // Автомоб. дороги: Информ. сб. — М., ЦБНТИ Росавтодора, 1991. Вып. № 4. — С. 1–48.
10. Белый А. А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений / А. А. Белый // Научно-практический журнал «Наука и бизнес: пути развития». — 2016. — № 10(64). — Тамбов: Изд. «Фонд развития науки и культуры». — С. 9–20.
11. Васильев А. И. Вероятная оценка износа железобетонных конструкций / А. И. Васильев, До Минь Хиус // Транспортное строительство. — 2009. — № 3. — С. 18–20.
12. Шестериков В. И. Оценка долговечности мостов с различными конструкциями пролетных строений / В. И. Шестериков // Сб. трудов НПО «Росдорнии». — М.: Информавтодор, 1993. — Вып. 6. — С. 157–167.
13. Шермухамедов У. З. Оценка технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений (на примере г. Ташкента) / У. З. Шермухамедов, А. А. Белый, М. М. Собирова и др. // Путевой навигатор. — СПб., 2023. — № 57(83). — С. 44–51.
14. Шермухамедов У. З. Влияние точности настройки динамических гасителей колебаний на сейсмостойкость мостов / У. З. Шермухамедов, И. О. Кузнецова // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта. — 2012. — Вып. 41. — С. 175–180.

Дата поступления: 08.01.2025

Решение о публикации: 16.02.2025

Контактная информация:

ШЕРМУХАМЕДОВ Улугбек Забихуллович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Мосты и тоннели»; ulugbekjuve@mail.ru

БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич — д-р техн. наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели»; технический директор; andbeliy@mail.ru

СОБИРОВА Маъмура Мирабдулла кизи — PhD, ст. преподаватель кафедры «Искусственные сооружения на автомобильных дорогах»; mamura_9105@bk.ru

КАДИРОВА Шарофат Шавкатовна — ст. преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»; irana_skorpion@mail.ru

Mathematical Model and Algorithm for Assessing and Predicting the Technical Condition of Reinforced Concrete Bridge Structures

U. Z. Shermukhamedov¹, A. A. Belyi^{1,2}, M. M. Sobirova¹, Sh. Sh. Kadirova¹

¹Tashkent State Transport University, 1, Temiryulchilar Str., Tashkent, 1100167, Uzbekistan

²K2 Engineering LLC, 2 bld 3, Gorbunova Str., Moscow, 123290, Russian Federation

For citation: Shermukhamedov U. Z., Belyi A. A., Sobirova M. M., Kadirova Sh. Sh. Mathematical Model and Algorithm for Assessing and Predicting the Technical Condition of Reinforced Concrete Bridge Structures // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 196–205. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-196-205

Summary

Purpose: To consider the issue of developing a mathematical model and algorithm for assessing and predicting the technical condition of urban reinforced concrete bridge structures based on the performance criteria evaluation. The necessity of the mathematical model for forecasting the bridge structure engineering condition to maintain the reliability and functionality of the Tashkent city bridge facilities at the required level has been investigated. **Method:** The hierarchy analysis method made it possible to optimally express this formula. The given method serves as a tool for problem solving by selecting the best option from those given. This method allows determining the value-based order of investment projects implementation. Criteria weights have been calculated in MPRIORITY 1.0. **Results:** The viaduct at the intersection of Gavkhar and Bunyodkor streets in Tashkent has been found to be in an unsatisfactory functioning condition. On this basis, it has been revealed that the service life of this structure is 35–38 years according to the $W(t)$ parametric equation. **Practical significance:** Increased number of roads and vehicles in cities every year causes increased traffic congestion. Determining the appropriate levels by assessing and predicting the technical condition of reinforced concrete bridge structures made it possible to predict their service life and to plan maintenance works to meet the required level. Thus, the mathematical model for assessing and predicting the technical condition of existing reinforced concrete bridges and viaducts developed specifically for the city of Tashkent allows maintaining the required level of reliability and functionality of the city bridges.

Keywords: Assessment criteria, bridges, hierarchy analysis method, traffic safety and comfort, durability, load capacity, carrying capacity and maintainability.

References

1. Shermukhamedov U. Z., Sobirova M. M., Azamov N. F. et al. Analysis of the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridge structures. The international scientific conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONME-CHYDRO 2022), August 23–24, 2023.

2. Shermukhamedov U. Z., Belyi A. A., Sobirova M. M. et al. K otsenke tehniko-ekspluatatsionnogo sostoyaniya gorodskih jelezobetonnykh mostov i puteprovodov [On the assessment of the technical and operational condition of urban reinforced concrete bridges and overpasses]. *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2024, vol. 21, Iss. 1, pp. 238–251. (In Russian).

3. Belyi A. A. Ob ekspluatatsii jelezobetonnykh mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga [On the operation of reinforced concrete bridges and overpasses in St. Petersburg]. *Sbornik materialov 61-oy Mezhd. nauch.-tekhn. konf., ch. III* [Collection of materials of the 61st Int. scientific-technical conf., part III]. St. Petersburg: SPbGASU Publ., 2008, pp. 12–19. (In Russian).

4. *ODM 218.4.001—2008* [ODM 218.4.001—2008]. (In Russian)

5. Belyi A. A. Analiz texnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruyemix jelezobetonnix mostovix soorujeniy Sankt-Peterburga [Analysis of the technical condition of reinforced concrete bridge structures in operation in St. Petersburg]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]. 2017, Iss. 3. Belgorod: RITs BGTU im. V. G. Shukhova Publ., 2017, pp. 37–44. DOI: 10.12737/24624. (In Russian)
6. Belyi A. A. Spособ otsenki texnicheskogo sostoyaniya jelezobetonnix mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga [Method for assessing the technical condition of reinforced concrete bridges and overpasses in St. Petersburg]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2009, Iss. 6, pp. 10–13. (In Russian).
7. Vdovenko A. V., Begoun S. E., Kulish V. I. et al. *Servis i monitoring dorojnix soorujeniy* [Service and monitoring of road structures]. Khabarovsk: KhabGTU Publ., 2002, 692 p. (In Russian)
8. Belyi A. A. *Metodika otsenki i prognozirovaniya texnicheskogo sostoyaniya gorodskix jelezobetonnix mostovix soorujeniy: diss. ... kand. tex. nauk* [Methodology for assessing and forecasting the technical condition of urban reinforced concrete bridge structures: diss. ... candidate of technical sciences]. Moscow: Moscow State Automobile and Road Institute (Technical University) Publ., 2009, 253 p. (In Russian)
9. Shesterikov V. I. Otsenka sostoyaniya avtodorojnih mostov i prognozirovaniye ego izmeneniya s pomoshyu pokazateley fizicheskogo iznosa [Assessment of the condition of road bridges and forecasting its changes using the physical deterioration indicator]. *Avtomob. dorogi: Inform. sb.* [Highways: Inform. collection]. Moscow: CBNTI Rosavtodor Publ., 1991, Iss. 4, pp. 1–48. (In Russian)
10. Belyi A. A. Osnovnie polojeniya metodiki prognozirovaniya srokov sluzhbi ekspluatiruyemix jelezobetonnix mostovix soorujeniy [Basic provisions of the methodology for forecasting the service life of operated reinforced concrete bridge structures]. *Nauchno-prakticheskiy zhurnal "Nauka i biznes: puti razvitiya"* [Scientific and practical journal "Science and Business: Development Paths"]. 2016, Iss. 10(64), Tambov: Izd. "Fond razvitiya nauki i kul'tury", pp. 9–20. (In Russian).
11. Vasiliev A. I., Do Minh Khilus. Veroyatnaya otsenka iznosa jelezobetonnix konstruksiy [Probable assessment of the deterioration of reinforced concrete structures]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2009, Iss. 3, pp. 18–20. (In Russian)
12. Shesterikov V. I. Otsenka dolgovechnosti mostov s razlichnimi konstruksiyami proleznix stroyeniy [Assessment of the durability of bridges with different designs of superstructures]. *Sb. trudov NPO "Rosdornii"* [Collection of works of NPO "Rosdornii"]. Moscow: Informavtodor Publ., 1993, Iss. 6, pp. 157–167. (In Russian).
13. Shermukhamedov U. Z., Belyi A. A., Sobirova M. M. et al. Otsenka tehnikeskogo sostoyaniya gorodskix jelezobetonnix mostovix soorujeniy (na primere g. Tashkenta) [Assessment of the technical condition of urban reinforced concrete bridge structures (using the city of Tashkent as an example)]. *Putevoy navigator* [Travel navigator]. St. Petersburg, 2023, Iss. 57(83), pp. 44–51. (In Russian)
14. Shermukhamedov U. Z., Kuznetsova I. O. Vliyaniye tochnosti nastroyki dinamicheskix gasiteley kolebaniy na seysmostoykost mostov [Influence of the accuracy of adjustment of dynamic vibration dampers on the seismic resistance of bridges]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. Nauka i progress transporta* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. Science and progress of transport]. 2012, Iss. 41, pp. 175–180. (In Russian)

Received: January 08, 2025

Accepted: February 16, 2025

Author's information:

Ulugbek Z. SHERMUKHAMEDOV —

Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department of Bridges and Tunnels; ulugbekjuve@mail.ru

Andrey A. BELIY — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Department of Bridges and Tunnels; Technical Director; andbelyi@mail.ru

Mamura M. SOBIROVA — PhD, Senior Lecturer, Department of Artificial Structures on Highways; mamura_9105@bk.ru

Sharofat Sh. KADIROVA — Senior Lecturer, Department of Bridges and Tunnels;

irana_skorpion@mail.ru

УДК 624.012.454:691.714

Строительные конструкции с применением композиционных материалов на основе бетона

К. В. Талантова

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

Для цитирования: Талантова К. В. Строительные конструкции с применением композиционных материалов на основе бетона // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 206–214. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-206-214

Аннотация

Цель: По содержанию части публикаций в открытой печати и Internet, посвященных композиционным материалам, очевидна целесообразность вновь обратиться к базовым принципам их создания, формированию свойств и уйти от их механистического понимания сложных систем как суммы свойств компонентов. В открытой печати достаточно широко представлена информация о композиционных материалах с различными типами волокон и матриц, в том числе на основе бетона. Однако нередко авторы, представляя результаты исследований, к композиционным относят практически все материалы, состоящие из двух или более компонентов. **Методы:** Оценка состояния предлагаемой информации выполняется на основе анализа информации, представленной в открытой печати и Internet, в том числе ведущих специалистов в области строительных конструкций и композиционных материалов, а также результатов экспериментально-теоретических исследований автора. **Результаты:** Современный уровень знаний о композиционных материалах можно оценить как весьма значительный. Повсеместно в открытой печати и на страницах Internet появляется информация о конструктивных решениях, выполненных с использованием композиционных материалов, интересных и весьма перспективных, обладающих заданными (требуемыми) свойствами и высокими технико-экономическими показателями. **Практическая значимость:** В научных изданиях, на страницах Internet нередко нет четкого и корректного представления о композиционных материалах. В статье делается попытка обратить внимание специалистов на необходимость осмысленно проводить исследования конструкций на основе композиционных материалов и привести термины и определения, принятые в профессиональном сообществе, в соответствие с их физическим и техническим смыслом, что позволит получать ожидаемый результат, не теряя времени и средств.

Ключевые слова: Композиционные материалы, заданные свойства, тип волокон, матрица, принципы создания, формирование свойств, многокомпонентные материалы, железобетон, синергетика.

Введение

Ни один из известных строительных материалов не обладает суммой свойств: одновременно малой плотностью и прочностью, прочностью и пластичностью, малым весом и термостойкостью и т. д. В случае, когда необходимо обеспечить целый комплекс свойств, которым должен

обладать один материал для обеспечения эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкции, необходимо затратить значительные средства, что далеко не всегда дает желаемый результат. Решить эту проблему удалось, когда специалисты научились создавать композиционные материалы (композиты) [1–7].

Композиция — сочетание

В широком смысле слова практически всякий современный материал представляет собой композицию, поскольку все материалы редко применяются в чистом виде. Композиция — от лат. *compositio*, букв. — соположение, складывание, составление, сочетание. Это создает определенные сложности с точки зрения использования термина — он распространяется зачастую механически на все многокомпонентные системы.

Профессор Массачусетского технологического института (MIT) Альберт Дитц пишет: «Наука и техника, подобно литературе и искусству, имеют свои модные фразы и штампы. Одним из самых модных в наше время является словосочетание “композиционные материалы”, содержащее в новой форме очень старую и простую мысль о том, что совместная работа разнородных материалов дает эффект создания нового материала, обладающего свойствами, существенно превосходящими свойства исходных компонентов» [2–4].

Композиционные материалы (композиты) состоят из двух и более компонентов, количественное соотношение которых должно быть сопоставимым. Компоненты существенно отличаются по свойствам, а их сочетание и физико-химические процессы создают синергетический эффект (синергетика — состояние системы) и параметры порядка (управляющие параметры), изменение которых позволяет изменять состояние системы (управлять состоянием) [5]. Очевидно, важной характеристикой композиционного материала (KM) является именно последнее.

Следует отметить, что необходимым условием получения нового материала со свойствами, превосходящими свойства компонентов, является формирование межфазного слоя в результате физико-химического взаимодействия между компонентами.

В настоящее время трудно найти такую отрасль современной техники, в которой не

использовались бы конструкции из композиционных материалов. Стремление получить наименьшую материалоемкость (изделий) элементов конструкций при требуемой прочности и жесткости, а также возможность варьирования свойств материала за счет изменения структуры армирования привело к необходимости использования композитных балок, пластин и оболочек слоистой структуры в качестве составляющих элементов тонкостенных инженерных сооружений в различных отраслях народного хозяйства (в машино-, тракторо- и судостроении, в авиационной и ракетно-космической технике и т. п.) [2, 4].

На сегодняшний день основные принципы создания композиционных материалов и элементов конструкций с их применением достаточно глубоко изучены. Однако необходимо вновь обратиться к работам ученых, в которых излагаются базовые данные по созданию композиционных материалов. К таким исследованиям можно отнести работы отечественных и зарубежных специалистов, где дана классификация композитов, свойства, области применения [6–8].

Композиционные материалы

Какие же материалы можно отнести к композиционным? В исследованиях Фудзии и Дзако [5] сказано: «Под композитами следует понимать материалы, состоящие из двух и более разнородных материалов, обладающие свойствами, которых не имели исходные материалы. В строении композиционного материала выделяют дисперсную фазу и матрицу (связующее)».

Таким образом, обобщая результаты исследований, можно заключить, что композиционные материалы характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из компонентов в отдельности. По своим свойствам композиции превосходят средние или суммарные свойства отдельных компонентов, обнаруживая синерге-

тический эффект [8]. Такое определение разделяют многие специалисты и ученые в мире¹.

Ведущий специалист NASA в области механики композиционных материалов С. С. Chamis в своей работе [6] отметил, что благодаря появлению композиционных материалов и, в частности, материалов, армированных волокнами, конструктору предоставляется свобода эффективного использования материалов. Это дает возможность одновременно проектировать и конструкцию, и материал.

Когда проектируется элемент с применением композиционного материала (КМ) или из КМ, как и из любого другого материала, прежде всего оцениваются условия его эксплуатации, в соответствии с чем подбирается тип КМ, выбираются материалы для создания элемента из КМ для заданных условий, определяются статическая (динамическая) схема работы элемента, нагрузки и воздействия, соответствующие принятой схеме. Но именно применение композиционных материалов позволяет управлять и их свойствами, и характеристиками разрабатываемых элементов конструкций. В таких условиях специалистам нужен материал с заданными свойствами [7, 9].

В 70-е годы XX века исследования КМ в мире и СССР приняли систематический характер. На мировом рынке в 1973 г. появились стальные волокна как материал для промышленного армирования [10]. Появление фибры как самостоятельного технологического продукта для армирования стимулировало исследования и дальнейшее применение в строительной отрасли [9–11]. Благодаря полученным результатам применения стальной фибры в дорожных одеждах и в отделке тоннелей подтвердились уникальные эксплуатационные свойства сталефибробетона [10, 11].

¹ URL: <https://bigenc.ru/c/kompozi-tsionnye-materialy-1d46d3>.

Фибробетон

Композиты на основе бетона — фибробетоны в зависимости от вида бетона (тяжелого, легкого и ячеистого), типа армирующего волокна (стальное, базальтовое, стеклянное, полипропиленовое и т. п.), как правило, имеют названия, в соответствии с которыми можно ожидать их физико-механические свойства: сталефибробетон, базальтофибробетон, стеклофибробетон и т. п.

На сегодняшний день исследования композиционных материалов, сталефибробетона (СФБ), в том числе, и конструкций на их основе отечественными и зарубежными специалистами выполняются более 100 лет [1–14].

Н. Ф. Porter [12] в 1910 году провел серию тестов по «улучшению прочности бетона». По полученным результатам он сделал вывод, что присутствие коротких волокон в бетоне повышает его прочность при сжатии и предел прочности при растяжении.

Сложно принять некорректный термин «улучшение прочности бетона» и далее «наличие коротких волокон в бетоне повышает его прочность». Возможно, это ошибки перевода, но и в отечественных публикациях по-прежнему идет речь об «улучшении характеристик бетона» [15]. Более того, при обсуждении темы «Композиционные материалы» в интернете указывается, что «типичные инженерные композитные материалы включают: «Железобетон и каменную кладку»².

Не менее интересная информация представлена в конспекте лекций дисциплины «Железобетонные и каменные конструкции»: «Железобетон — это композиционный материал (пластичная (!) основа (бетон) армирована прочным наполнителем (!) — стальными стержнями или изделиями) ...» [16].

Что касается железобетона, то известно, что создание железобетонных конструкций (ЖБК)

² URL: https://in.Wikipedia.org/wiki/Composite_material.

оказалось возможным благодаря гарантированной совместности работы, адаптивности напряжений и деформаций арматуры и бетона, что обеспечивается, помимо прочего, их надежным сцеплением по поверхности контакта [17, 18]. При этом железобетон — строительный термин, принятый в профессиональной среде, — обобщающее название элементов железобетонных конструкций (плит, балок, колонн и т. п.), не материала (!), тем более композиционного [19] (подобно принятому термину, например, мебель (стол, стул).

О каменной кладке говорить, что это композиционный материал, некорректно. Во-первых, кладка — не материал, это конструкция, возводимая из штучных изделий, соединенных раствором швом. Прочность кладки при сжатии всегда меньше, чем прочность камня, из которого она возведена [20]. Ожидать роста прочности кладки, по сравнению с прочностью камня (кирпича) и раствора, что отличает композиты от других материалов, бессмысленно, так как это противоречит требованиям норм [20].

В смысле сочетания компонентов (вяжущего, заполнителей, воды) бетон — композиция. Однако составляющие бетона даже при их взаимодействии не обеспечивают формирование уникальных свойств, что имеет место при создании композиционных материалов [5].

Известно, что регулировать физико-механические свойства бетона и конструкций на его основе возможно за счет рационального подбора его состава, изменения характеристик компонентов, организации структуры материала, выбора технологии приготовления смеси и формования изделия, условий его твердения [17].

Введение дисперсных волокон в бетонную смесь не просто меняет свойства бетона, а приводит к созданию нового (композиционного) материала на основе бетонной матрицы со свойствами, заданными при создании элемента конструкции

в соответствии с эксплуатационными требованиями к элементу. При этом в композиционном материале — фибробетоне — при введении волокон в бетон формируется бетонная матрица, с присущими ей характеристиками, отличающимися от характеристик исходного бетона [9, 21]. Это различие является результатом взаимодействия компонентов: бетона при введении волокон (частиц), а «их сочетание и физико-химические процессы, происходящие между ними (взаимодействие), и дают синергетический эффект», что приводит к формированию уникальных свойств [8].

Необходимо отметить, что «волокна играют первичную основную роль в композиционных материалах, они могут придавать цементной смеси или бетону значительное количество “относительной вязкости”, которая обозначает способность такого материала абсорбировать относительно большое количество энергии перед отказом, они придают композиционным материалам многие значимые свойства» [2].

В работе «Оценка конкурентных преимуществ композиционных материалов в строительных конструкциях» [22] нет сведений, о каком композиционном материале идет речь, представлено «сравнение результатов испытания лотка «железобетонного» и из композиционного материала», без данных о конструктивных решениях лотков, не говоря уже о выборе материалов, порядке, результатах и анализе испытаний. Неясно, как без конкретных сведений оценивать преимущества неизвестного композиционного материала в неизвестных конструкциях лотков, хотя сомнений в «конкурентных преимуществах композиционных материалов нет».

Огнеупорная промышленность стала использовать волокна нержавеющей стали для получения литой фибры и армирования ею бетона в основном в США и Японии [6, 23]. Так, исследования СФБ при высокотемпературном нагреве при пожаре показали, что энергия разруше-

ния СФБ до 200 раз превышает этот показатель обычного бетона, а коэффициент интенсивности напряжений выше в 12 раз [24]. Сталефибробетон с фиброй из низкоуглеродистой стали выдерживает нагрев, без снижения прочности, до температуры 450–537 °С; с фиброй из нержавеющей стали до температуры 1590–1595 °С [25].

Задание свойств конструкции путем подбора компонентов, организации армирования в преимущественном направлении в соответствии с условиями нагружения или напряженно-деформированного состояния (НДС) позволяет обеспечить эффективную работу и материала, и конструкции.

С точки зрения принципов формирования структуры композиционного материала [4, 5] можно утверждать, что на уровень упруго-прочностных свойств сталефибробетона как композитного материала влияют: тип матрицы и волокна, объемное содержание компонентов, геометрические параметры волокон, распределение их по объему, уровень взаимодействия на границе «волокно — матрица» [21].

Кроме того, необходимо отметить, что фибробетоны создаются, как правило, на основе мелкозернистого бетона. Результаты исследований показали, что в качестве бетона-матрицы следует применять мелкозернистый бетон [9, 21]. В случае необходимости введения в смесь крупного заполнителя его количество и размер необходимо выбирать с учетом геометрии фибры и обязательной лабораторной корректировкой состава СФБ смеси.

В СП «Конструкции сталефибробетонные ...» [26] приводится определение композиционного материала на основе тяжелого или мелкозернистого бетона. При этом результаты исследований показали, что введение крупного заполнителя при приготовлении сталефибробетонной смеси существенно снижает (до 80 %) эффективность фибрового армирования стальной фиброй [27].

Выводы

Таким образом, развитие строительной техники базируется на разработке новых конструктивных решений, что невозможно без создания новых современных материалов. Однако новые материалы, в том числе композиционные, обладают свойствами, которые не являются простой суммой свойств компонентов, а формируются на более тонком уровне, которым можно или нужно управлять.

При этом, чтобы не вносить путаницу в принятые, устоявшиеся профессиональные понятия и термины, которые сформированы на основе многолетних исследований и строительной практики, не следует терминам присваивать новый, необоснованный физический смысл. В противном случае не удастся получить от новых решений ожидаемый результат или просто потерять и время, и средства.

Список источников

1. Рудой Б. Л. Композиты / Б. Л. Рудой. — М.: Моск. рабочий, 1976. — 144 с.
2. Кербер М. Л. Композиционные материалы / М. Л. Кербер // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 5. — С. 123–127.
3. Берлин А. А. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А. А. Берлин и др. — М.: Химия, 1990. — 240 с.
4. Браутман Л. Механика композиционных материалов. Пер. с англ. / Л. Браутман, Р. Крок, Дж. Сендечки (ред.). — М.: Мир, 1978. — Т. 2 — 566 с.
5. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов. Пер. с японск. / Т. Фудзии, М. Дзако. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
6. Композиционные материалы. В 8 т. Т. 8, Ч. II: Анализ и проектирование конструкций / Ред. К. Чамис, пер. с англ. Г. Г. Портнова. — М.: Машиностроение, 1978. — 264 с.
7. Кочешков И. В. Анализ понятия и принципов создания композиционных материалов / И. В. Кочешков //

Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2016. — № 2. — С. 3–11. — DOI: <https://doi.org/10.12737/17788> (дата обращения: 22.11.2024).

8. Жарин Д. Прикладная синергетика композиционных материалов / Д. Жарин, А. Бобрышев, С. Курин // LAP LAMBERT Academic Publishing. — 2012. — 152 с.

9. Талантова К. В. Сталефибробетон и конструкции на его основе / К. В. Талантова, Н. М. Михеев. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. — 276 с.

10. Beddar, M. Fiber reinforced concrete: past, present and future / M. Beddar // Бетон и железобетон — пути развития: науч. тр. 2-ой Всерос. (Междунар.) конф. по бетону и железобетону: в 5 т. Т. 3: Секционные доклады, секция «Технология бетона». — М.: Дипак, 2005. — С. 228–234.

11. Vandewalle M. The use of fiber reinforced concrete in road constructions / M. Vandewalle, N. V. Bekaert // Proc. Int. Symp. Fibre Reinforced Concr., Madras, Des. 16–19, 1987. — Rotterdam, 1988. — Vol. 2. — Pp. 6.111–6.119.

12. Porter H. F. Preparation of concrete from selection of materials to final disposition / H. F. Porter // J. Am. Conc. Inst. — 1910. — Vol. 6. — P. 296.

13. Некрасов В. П. Описание железобетонных изделий / В. П. Некрасов. — Привилегия, выданная 27 марта 1909. кл. 37 п. 4/01 №15271, заявл.13/XI-1907.

14. Некрасов В. П. Метод косвенного вооружения бетона / В. П. Некрасов. — М.: Транспечать, 1925. — 255 с.

15. Клещевникова В. И. Разновидности материалов для дисперсного армирования бетона / В. И. Клещевникова, А. С. Логвинова, С. В. Беляева // Alfabuild. — 2019. — № 1(8). — С. 59–74.

16. Сивоконь Ю. В. Конспект лекций по строительным конструкциям: учеб. пособие / Ю. В. Сивоконь, В. Р. Касимов. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2019. — 132 с.

17. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов / И. А. Рыбьев. — 2-е изд., испр. — М.: Высшая школа, 2004. — 701 с.

18. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном / М. М. Холмянский. — М.: Стройиздат, 1981. — 184 с.

19. Железобетон в XXI веке. Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России: монография / Коллектив авторов под. ред. К. В. Михайлова. — М.: НИИЖБ, 2001. — 390 с.

20. СП 15.13330.2020. Свод правил. Каменные и армокаменные конструкции. СНиП II-22-81 (утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2020 № 902/пр.) (ред. от 21.12.2023).

21. Лобанов И. А. Особенности структуры и свойства дисперсно-армированных бетонов / И. А. Лобанов // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: межвуз. тем. сб. тр. — Л., 1986. — С. 5–10.

22. Галиев Л. С. Оценка конкурентных преимуществ композиционных материалов в строительных конструкциях / Л. С. Галиев, В. В. Полити, В. С. Канхва // Отходы и ресурсы. — 2022. — Т. 9. — № 3. — URL: https://resources.today/PDF/19ECOR_322.pdf. — DOI: 10.15862/19ECOR322.

23. Wooldridge J. F. Reinforced Refractory Fibers Prove Their Value / J. F. Wooldridge // Brick and Clay Record. — 1978. — Vol. 173. — Iss. 4. — Pp. 36–39.

24. Дорф В. А. Влияние характеристик стальной фибры и ее содержание в сталефибробетоне на его огнестойкость / В. А. Дорф, Р. О. Красновский, Д. Е. Капустин и др. // Вестник гражданский инженеров СПбГАСУ. — 2017. — № 5(64). — С. 38–46.

25. Иванов М. А. Влияние повышенных температур на прочностные свойства сталефибробетона / М. А. Иванов // Известия вузов. Строительство и архитектура. — 1984. — № 12. — С. 129–132.

26. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. — М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2017. — 40 с.

27. Куликов А. Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях: техн. наук / А. Н. Куликов. — Л., 1975.

Дата поступления: 14.01.2025

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

ТАЛАНТОВА Клара Васильевна — д-р техн. наук, доц.; talant_bar@mail.ru

Use of Concrete-Based Composite Materials in Construction

K. V. Talantova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Talantova K. V. Use of Concrete-Based Composite Materials in Construction // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 206–214. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-206-214

Summary

Purpose: On reviewing some of the Internet open publications devoted to composite materials, the author understands a clear need to revisit the basic principles of their development and the formation of properties and to move away from mechanistic understanding of complex system properties as the sum of those of their components. The information on composite materials with different types of fibers and matrices including those based on concrete is widely available in the open publications. However, when presenting the results of research, authors often refer to almost all materials consisting of two or more constituent materials as composite.

Methods: The proposed information has been assessed based on the analysis of the Internet open publications, leading experts in the field of construction and composite materials and the author's experimental and theoretical studies. **Results:** Composite materials have been widely investigated and applied recently. Innovative design solutions using intriguing and very promising composite materials with specified (required) properties have been researched in a number of open publications and the Internet. **Practical significance:** In scientific publications and on the Internet pages, there is often no clear and accurate understanding of composite materials. The article attempts to draw experts' attention to the need for the research on structures based on composite materials and bring the terms and definitions accepted in the professional community into line with their physical and technical meaning, which will allow obtaining the expected results without wasting time and money.

Keywords: Composite materials, specified properties, fiber type, matrix, principles of creation, formation of properties, multicomponent materials, reinforced concrete, synergetic.

References

1. Rudoy B. L. *Kompozity* [Composites]. Moscow: Mosk. Rabochiy Publ., 1976, 144 p. (In Russian)
2. Kerber M. L. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros educational journal]. 1999, Iss. 5, pp. 123–127. (In Russian)
3. Berlin A. A. et al. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Principles of creation of composite polymer materials]. Moscow: Khimiya Publ., 1990, 240 p. (In Russian)
4. Brautman L., Krok R., Sendetski Dzh. (red.) *Mekhanika kompozitsionnykh materialov. Per. s angl.* [Mechanics of composite materials. Trans. from English]. Moscow: Mir Publ., 1978, vol. 2, 566 p. (In Russian)
5. Fudzii T., Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov. Per. s yaponsk.* [Fracture mechanics of composite materials. Trans. from Japanese]. Moscow: Mir Publ., 1982, 232 p. (In Russian)
6. *Kompozitsionnye materialy. V 8 t. T. 8, Ch. II: Analiz i proektirovanie konstruksiy. Red. K. Chamis, per. s angl. G. G. Portnova* [Composite materials. In 8 volumes. Vol. 8, Part II: Analysis and design of structures. Ed. K. Chamis, translated from English by G. G. Portnov]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978, 264 p. (In Russian)
7. Kocheshkov I. V. *Analiz ponyatiya i printsipov sozdaniya kompozitsionnykh materialov* [Analysis of the concept and principles of creating composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-intensive

- technologies in mechanical engineering]. 2016, Iss. 2, pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.12737/17788> (accessed: November 22, 2024). (In Russian)
8. Zharin D., Bobryshev A., Kurin S. *Prikladnaya sinergetika kompozitsionnykh materialov* [Applied synergetics of composite materials]. LAP LAMBERT Academic Publishing [LAP LAMBERT Academic Publishing]. 2012, 152 p. (In Russian)
9. Talantova K. V., Mikheev N. M. *Stalefibrobeton i konstruktsii na ego osnove* [Steel fiber concrete and structures based on it]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2014, 276 p. (In Russian)
10. Beddar, M. Fiber reinforced concrete: past, present and future [Fiber reinforced concrete: past, present and future]. *Beton i zhelezobeton — puti razvitiya: nauch. tr. 2-oy Vseros. (Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu: v 5 t. T. 3: Sektsionnye doklady, sektsiya “Tekhnologiya betona”* [Concrete and reinforced concrete — ways of development: scientific. t. 2-nd All-Russian (International) Conf. on Concrete and Reinforced Concrete: in 5 vols. Vol. 3: Sectional reports, section “Concrete Technology”]. Moscow: Dipak Publ., 2005, pp. 228–234. (In Russian)
11. Vandewalle M., Bekaert N. V. The use of fiber reinforced concrete in road constructions. Proc. Int. Symp. Fibre Reinforced Concr., Madras, Des. 16–19, 1987. Rotterdam, 1988, vol. 2, pp. 6.111–6.119.
12. Porter H. F. Preparation of concrete from selection of materials to final disposition. J. Am. Conc. Inst., 1910, vol. 6, p. 296.
13. Nekrasov V. P. *Opisanie zhelezobetonnykh izdeliy. Privilegiya, vydannaya 27 marta 1909. kl. 37 p. 4/01 №15271, zayavl.13/XI-1907* [Description of reinforced concrete products. Privilege issued on March 27, 1909. cl. 37 p. 4/01 № 15271, declared.13/XI-1907]. (In Russian)
14. Nekrasov V. P. *Metod kosvennogo vooruzheniya betona* [Method of indirect armature of concrete]. Moscow: Transpechat’ Publ., 1925, 255 p. (In Russian)
15. Kleshchevnikova V. I., Logvinova A. S., Belyaeva S. V. *Raznovidnosti materialov dlya dispersnogo armirovaniya betona* [Types of materials for dispersed reinforcement of concrete]. Alfabuild, 2019, Iss. 1(8), pp. 59–74. (In Russian)
16. Sivokon’ Yu. V., Kasimov V. R. *Konspekt lektsiy po stroitel’nym konstruktsiyam: ucheb. posobie* [Lecture notes on building structures: textbook]. N. Novgorod: NNGASU Publ., 2019, 132 p. (In Russian)
17. Ryb’ev I. A. *Stroitel’noe materialovedenie: ucheb. posobie dlya stroit. spets. Vuzov, 2-e izd., ispr.* [Construction materials science: a textbook for construction specialty universities, 2nd ed., corrected]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2004, 701 p. (In Russian)
18. Kholmyanskiy M. M. *Kontakt armatury s betonom* [Contact of reinforcement with concrete]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1981, 184 p. (In Russian)
19. *Zhelezobeton v XXI veke. Sostoyanie i perspektivy razvitiya betona i zhelezobetona v Rossii: monografiya. Kollektiv avtorov pod. red. K. V. Mikhaylova* [Reinforced concrete in the 21st century. The state and prospects for the development of concrete and reinforced concrete in Russia: a monograph. Collective of authors under editorship of K. V. Mikhailov]. Moscow: NIIZhB Publ, 2001, 390 p. (In Russian)
20. *SP 15.13330.2020. Svod pravil. Kamennye i armokamennye konstruktsii. SNIIP II-22-81 (utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 30.12.2020 № 902/pr.) (red. ot 21.12.2023)* [SP 15.13330.2020. Code of Practice. Stone and Reinforced Stone Structures. SNIIP II-22-81 (approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated 30.12.2020 № 902/pr.) (as amended on 21.12.2023)]. (In Russian)
21. Lobanov I. A. *Osobennosti struktury i svoystva dispersno-armirovannykh betonov* [Features of the structure and properties of dispersion-reinforced concrete]. *Tekhnologiya izgotovleniya i svoystva novykh kompozitsionnykh stroitel’nykh materialov: mezhvuz. tem. sb. tr.* [Manufacturing technology and properties of new composite building materials: interuniversity. thematic collection of works]. L., 1986, pp. 5–10. (In Russian)
22. Galiev L. S., Politi V. V., Kankhva V. S. *Otsenka konkurentnykh preimushchestv kompozitsionnykh materialov v stroitel’nykh konstruktsiyakh* [Assessment of competitive advantages of composite materials in building structures]. *Otkhody i resursy* [Waste and resources]. 2022, vol. 9, Iss. 3. Available at: <https://resources.today/>

PDF/19ECOR 322.pdf. DOI: 10.15862/19ECOR322. (In Russian)

23. Wooldridge J. F. Reinforced Refractory Fibers Prove Their Value. *Brick and Clay Record*, 1978, vol. 173, Iss. 4, pp. 36–39.

24. Dorf V. A., Krasnovskiy R. O., Kapustin D. E. Vliyaniye kharakteristik stal'noy fibry i ee sodержание v stale-fibrobetone na ego ognestoykost' [Influence of the characteristics of steel fiber and its content in steel-fiber concrete on its fire resistance]. *Vestnik grazhdanskiy inzhenerov SPbGASU* [Bulletin of civil engineers of St. Petersburg state university of architecture and civil engineering]. 2017, Iss. 5(64), pp. 38–46. (In Russian)

25. Ivanov M. A. Vliyaniye povyshennykh temperatur na prochnostnye svoystva stale-fibrobetona [Bulletin of civil engineers of St. Petersburg state university of architecture and civil engineering]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of universities. Construction and architecture]. 1984, Iss. 12, pp. 129–132. (In Russian)

26. SP 360.1325800.2017. *Konstruktzii stalefibrobetonnye. Pravila proektirovaniya* [SP 360.1325800.2017. Steel-fiber concrete structures. Design rules]. Moscow: FGUP NITs "Stroitel'stvo" Publ., 2017, 40 p. (In Russian)

27. Kulikov A. N. *Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya svoystv fibrobetona pri bezgradientnom napryazhenom sostoyanii v kratkovremennykh ispytaniyakh: tekhn. nauk* [Experimental and theoretical studies of the properties of fiber-reinforced concrete in a gradient-free stress state in short-term tests: tech. sciences]. L., 1975. (In Russian)

Received: January 14, 2025

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Klara V. TALANTOVA — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; talant_bar@mail.ru

УДК 624.195

Опыт обследования и проведения инженерных расчетов тоннеля Сухарный Лозово–Севастопольской ж. д.

В. Н. Кавказский¹, Д. А. Соловьев¹, Р. А. Соловьев²

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

²Акционерное общество «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Российская Федерация, 191002, Санкт-Петербург, ул. Большая Московская, 2

Для цитирования: *Кавказский В. Н., Соловьев Д. А., Соловьев Р. А.* Опыт обследования и проведения инженерных расчетов тоннеля Сухарный Лозово–Севастопольской ж. д. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 215–227. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-215-227

Аннотация

Цель: Оценка технического состояния тоннеля Сухарный, являющегося важным элементом для эксплуатации железной дороги. В данной статье описывается опыт обследования и осуществления поверочных расчетов в соответствии с актуальными требованиями нормативной документации для подземных конструкций транспортных сооружений, находящихся в эксплуатации на участке Лозово–Севастопольской железной дороги полуострова Крым. **Методы:** Выполнялись работы по обследованию тоннеля Сухарный, в которые входили: обмерные работы, визуальное обследование и инструментальное обследование. **Результаты:** По результатам обследования были уточнены параметры обделки тоннеля. Затем проводились расчеты обделки с учетом уточненных параметров конструкций. Произведенный комплекс работ позволил сделать важные выводы и рекомендации по техническому состоянию конструкций тоннеля. **Практическая значимость:** После своего открытия Лозово–Севастопольская железная дорога соединила город Симферополь с центральной частью России и ускорила восстановление Севастополя и Черноморского флота после Крымской войны. В настоящее время участок дороги по прежнему находится в эксплуатации и является важной транспортной артерией, соединяющей город Севастополь с центральной частью России. В текущей геополитической ситуации особенно важно бесперебойное функционирование данной артерии, которое будет затруднительно без должного технического состояния тоннелей, находящихся на этой железной дороге. Поэтому проведенный комплекс обследовательских и расчетных работ, сделанные выводы и рекомендации имеют важное практическое значение.

Ключевые слова: Горные тоннели, Крым, обследование подземных сооружений, инженерные расчеты, сейсмическая активность.

Введение

Строительная отрасль непрерывно развивается. Совершенствуются технологии строительства, методы проектирования инженерных конструкций, появляется новое программное обеспечение для осуществления комплексных геотехнических расчетов. Подобные изменения не могут не затронуть нормативную документа-

цию, которая актуализируется сообразно темпам развития строительных технологий и методам проектирования инженерных конструкций.

В связи с этим представляется желательной актуализация технической документации по сооружениям, запроектированным и возведенным в соответствии с нормами и правилами прошлых поколений. Особенно это актуально для находя-

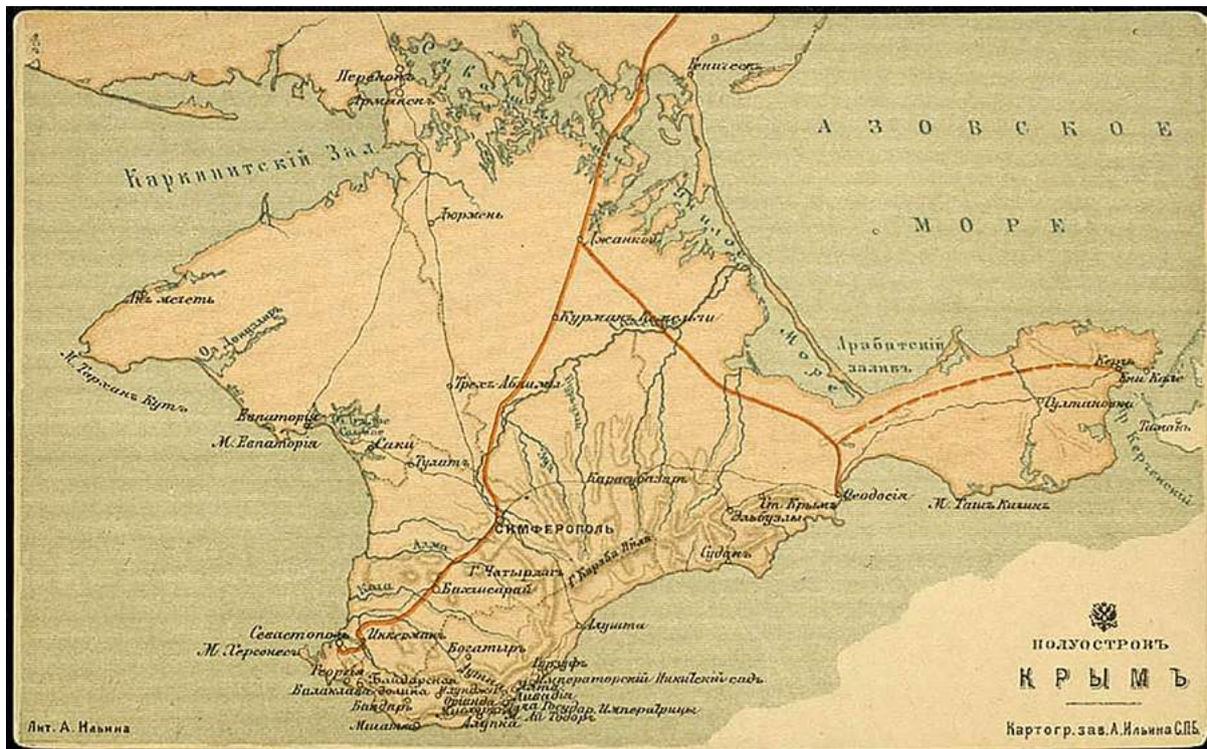


Рис. 1. Карта полуострова Крым. Лозово-Севастопольская железная дорога¹

щихся в эксплуатации сооружений, возведенных более века назад. Для подобных сооружений распространены ситуации отсутствия подробных проектных решений, частичного или полного отсутствия документации по расчетам элементов сооружений.

В данной статье описывается опыт обследования и выполнения поверочных расчетов в соответствии с актуальными требованиями нормативной документации для подземных конструкций транспортных сооружений, находящихся в эксплуатации на участке Лозово-Севастопольской железной дороги полуострова Крым.

Краткий исторический обзор

Лозово-Севастопольская железная дорога соединила город Симферополь с центральной частью России и ускорила восстановление Севастополя и Черноморского флота после Крымской

войны. Первый товарный поезд к железнодорожной станции Севастополя прошел 15 сентября 1875 г. [1–3].

Схема расположения железной дороги полуострова Крым представлена на рис. 1.

Дорогу длиной в 665 км от станции Лозовой через Джанкой до Севастополя построили за 4 года. При этом крымский участок из-за особенностей рельефа был очень сложным. Самые трудоемкие работы на трассе оказались на участке Мекензиевы горы — Севастополь. Предгорный рельеф местности при подходе к Севастополю поставил перед строителями сложную задачу. От станции Сюрень (современная ст. Верхнесадовое) железнодорожную трассу надо было поднять на высоту 150 м над уровнем моря, а затем опустить на 10-метровую отметку к урезу Севастопольской бухты. Поэтому из-за больших перепадов высот и сложного рельефа местности было

¹ URL: https://expositions.nlr.ru/ex_map/Krim/.

пробито шесть железнодорожных тоннелей, общая протяженность которых составляет около 2 км. Каждый из них получил свое имя.

Первый тоннель со стороны Симферополя — Сухарный. Своему названию он обязан Сухарной балке, в которой в начале XIX века Морское ведомство построило завод для выпуска сухарей. Второй — самый короткий тоннель — Графский, названный по имени графа М. И. Войновича, командовавшего Севастопольской эскадрой с 1889 по 1890 г. После Графского железная дорога вновь скрывается в очередном тоннеле, получившем название Белый от цвета известняка — инкерманского камня. Четвертый тоннель — Цыганский — самый длинный, по названию балки в Инкермане. Пятый тоннель — Троицкий — пересекает мыс, образованный Килен-балкой и Троицкой балкой. Шестой тоннель, украшенный аркой с рельефным орнаментом и эдикулами для скульптур, находился на Корабельной стороне, пробит под Лазаревскими казармами и получил название Городской.

С момента пуска дороги и тоннелей в эксплуатацию прошло 147 лет. Тоннели в настоящее время продолжают эксплуатироваться и, несмотря на преклонный возраст, выполнять свои функции. В текущей геополитической обстановке их дальнейшая бесперебойная эксплуатация является важной задачей для обеспечения связи города Севастополь с его портовыми мощностями и центральной частью России.

Основная информация о тоннеле Сухарный

Сухарный тоннель сооружался в 1872–1874 гг. под два пути широкой колеи 1524 мм, с между-путем 3800 мм без уширения на прямой. Длина тоннеля 329,5 м. Во время Великой Отечественной войны тоннель разрушался. При восстановлении в 1946 г. длина тоннеля была уменьшена. После чего тоннель эксплуатировался в таком

состоянии в течение 10 лет. В 1957–1958 гг. при выполнении капитального ремонта тоннель был восстановлен до первоначальной длины.

В связи с неудовлетворительным состоянием старой каменной обделки институт «Гипротранспуть» разработал проект капитального ремонта, а дорожный мостопоезд в течение 1970–1986 гг. его выполнял.

В настоящее время Сухарный тоннель эксплуатируется как однопутный с расположением рельсошпальной решетки со сдвижкой относительно оси тоннеля в сторону центра кривой.

В плане тоннель расположен на кривой радиусом $R = 525$ м, начало тоннеля — 1524-й километр (Симферопольский портал на ПК 2+31 м), конец тоннеля 1524-й километр (Севастопольский портал на ПК 5+60,5 м). В профиле тоннель односкатный с уклоном 12 ‰ в сторону ст. Инкерман. Максимальная глубина заложения — 30 м.

Обделка тоннеля в результате реконструкции 1970–1986 гг. претерпела изменения. По всей длине тоннеля обделка выполнена из монолитного бетона марки М200 с внутренним очертанием и междупутем, удовлетворяющим габариту приближения строения «С» с учетом его расположения на кривой (рис. 2). Обделка тоннеля состоит из трех участков. Двух удлиненных участков длиной 44 м со стороны Симферополя и 40 м со стороны Севастополя и участка реконструированной обделки длиной 245 м. На удлиненных участках в пространстве за стеной обделки устроен заобделочный дренаж. По длине тоннеля выполнены деформационные швы с шагом 20 м.

Горный массив, прорезанный тоннелем, в местах постройки порталов сложен плотными мергелистыми глинам, практически четвертичным делювием. В поперечном направлении все слои, кроме четвертичного делювия, залегают почти горизонтально, а в продольном — слабо наклонены от Северо-Западного портала к Юго-Западному. Тоннель прорезает от Северо-

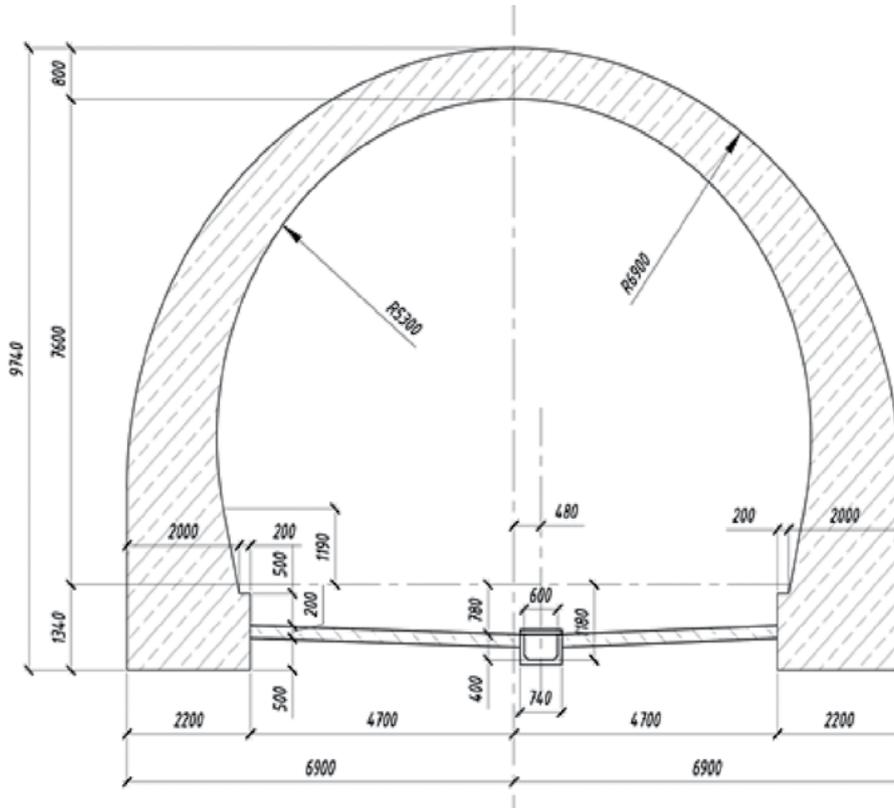


Рис. 2. Чертеж типовой конструкции обделки тоннеля Сухарный

Западного портала к середине тоннеля толщу из известняка глин мергелистых с маломощными линзовидными прослойками песка и в толще скального конгломерата в нижней части. От середины к юго-восточному portalу тоннель пройден в мергелистых глинах. Средний коэффициент крепости пород по шкале профессора Протодяконова $f = 1,5-2,0$, средний объемный вес грунта $\gamma = 2 \text{ т/м}^3$, а угол внутреннего трения $\varphi = 60-65^\circ$.

По данным действующего на текущий момент СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [4], город федерального значения Севастополь и прилегающая к нему территория расположены в сейсмически активном районе Крыма. В соответствии с приложением А СП («Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации», карта ОСР—2015) данная территория попадает в зону с расчетной сейсмической интенсивности в баллах шкалы

MSK-64 для средних грунтовых условий и трех степеней сейсмической опасности — А (10 %), В (5 %), С (1 %) в течение 50 лет. Район расположения тоннелей относится к сейсмически активным с расчетной сейсмической интенсивностью по шкале MSK-64 — 9 баллов.

В рамках обследования тоннеля Сухарный выполнялись следующие виды работ:

- обмерные работы;
- визуальное обследование;
- инструментальное обследование.

Обмерные работы

Одной из задач обследования тоннелей является выполнение обмерных работ посредством проведения геодезических и инструментальных измерений положения конструкций в пространстве. Для этих целей незаменимым приемом является трехмерное сканирование объекта. Данный

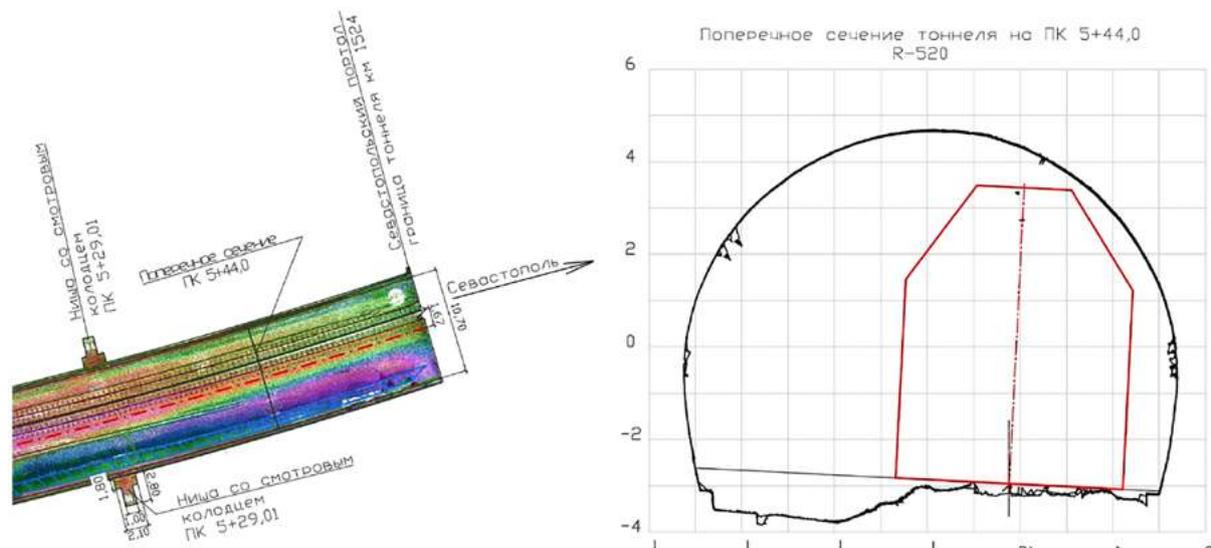


Рис. 3. Результаты трехмерного сканирования и построения поперечного сечения

подход обладает рядом преимуществ и позволяет получить с высокой точностью пространственную модель объекта и положения конструкций в пространстве. Перед началом сканирования создается опорная геодезическая сеть. В нашем случае сканирование выполнялось сканером Leica BLK360.

Результаты выполненного трехмерного сканирования обрабатываются в камеральных условиях, и на основе полученных данных строятся фактические очертания конструкций в различных сечениях, уточняются данные существующих конструкторских чертежей.

Пример результатов обмерных работ при помощи трехмерного сканирования с последующим построением сечений конструкций представлен на рис. 3.

Визуальное обследование

По результатам визуального обследования тела Сухарного тоннеля были выявлены многочисленные разнонаправленные трещины, а также многочисленные зоны увлажнения с образованием высолов и зоны протечек нефтепродуктов, приуроченные к трещинам и деформационным

швам. Зоны протечек нефтепродуктов и образования влажных и сухих высолов составили 50 % от общей площади обделки. По длине тоннеля данные дефекты распространены равномерно с наибольшей концентрацией с 17-го по 73-й участок. Также была выявлена зона повышенного трещинообразования на припортальном участке Симферопольского портала с 1-го по 12-й участок. Состояние Сухарного тоннеля можно охарактеризовать как ограниченно-работоспособное (по ГОСТ Р 57208—2016) [5].

Инструментальное обследование

Методика инструментального обследования тоннельных конструкций и заобделочного пространства разработана специалистами ПГУПС и апробирована на объектах Петербургского и Московского метрополитенов, а также на объектах транспортной инфраструктуры Сирийской Арабской Республики и подземных сооружениях Черкейской, Миатлинской, Гоцатлинской ГЭС [6, 7].

Данная методика предполагает выполнение работ в пять этапов.

На первом этапе прибором «Георадар ОКО-2», основанным на методе геолокации, определяется

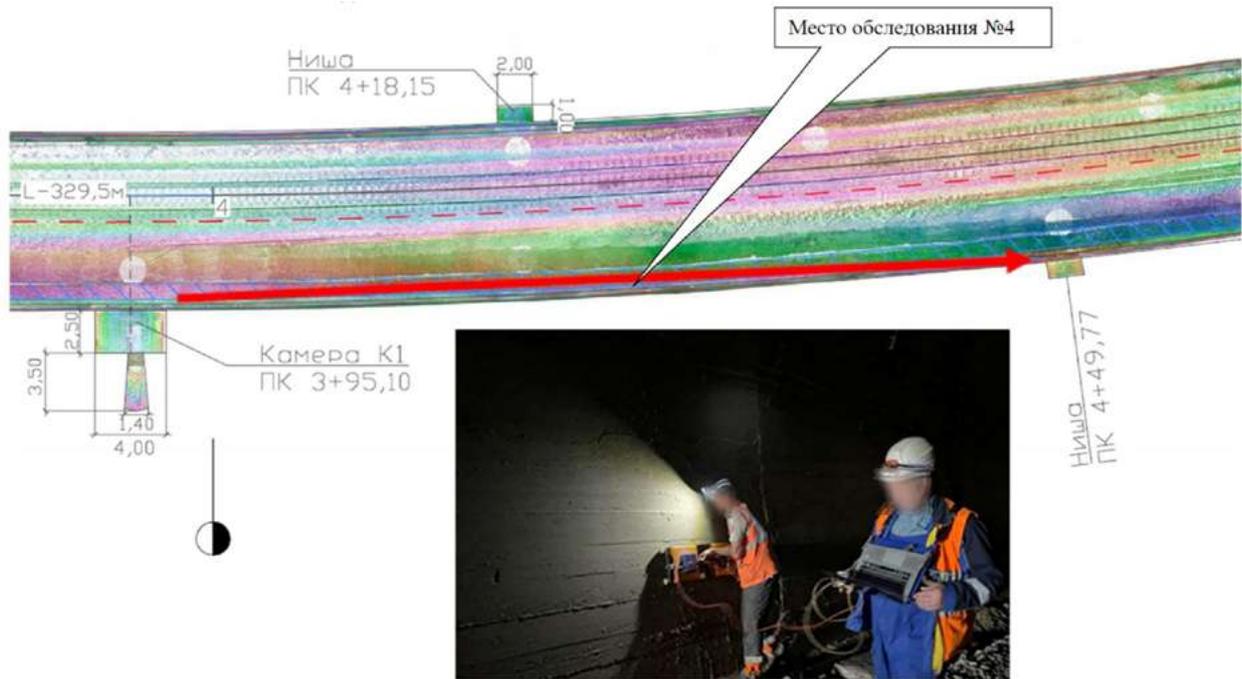


Рис. 4. Схема сканирования обделки георадаром, показанная на результатах трехмерного сканирования тоннеля (фото — Ш. Мукмагомедов)

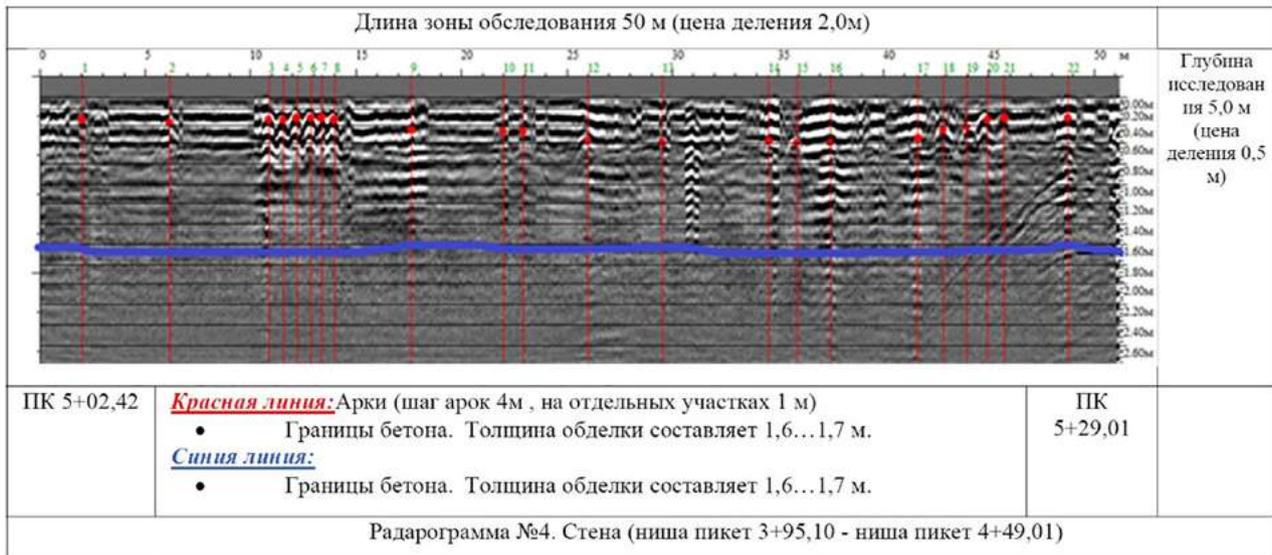


Рис. 5. Пример радарограммы обделки тоннеля

наличие арматуры, дефектов в бетоне и пустот за обделкой, а также состояние заобделочного пространства в целом.

На втором этапе определяется прочность тоннельной обделки методом неразрушающего контроля (методом отрыва со скалыванием).

На третьем этапе выполняется проверка полученных данных путем непосредственного выбуривания кернов бетона обделки и породы.

Четвертый этап — лабораторные испытания прочностных характеристик бетона в лицензированной лаборатории ПГУПС «Прочность мате-

риалов и конструкций» и обработка результатов всех измерений.

По результатам инструментального обследования были сделаны следующие выводы. Крупных областей дефектного бетона глубиной, сравнимой с толщиной обделки, не обнаружено. В заобделочном пространстве на срединном участке тоннеля длиной 55 м зафиксированы области водонасыщенного грунта с нагорной стороны. На нескольких участках стен обнаружены металлические арки временной крепи. Шаг арок составляет 4 м. В зонах усиления временной крепи арки расположены чаще, с шагом 1 метр. Скрытых областей дефектного бетона не обнаружено. Со стороны штольни обводненных грунтов не обнаружено. В обратном своде на участке ПК 2+31,00–ПК 2+88,18 установлено, что глубина фундамента портала составляет 2 м. Толщина слоя щебня составляет 0,5 м. Толщина слоя бетона плиты составляет 0,2–0,25 м. В лотковой части тоннеля водопроявлений не обнаружено. Крупных дефектов бетона не выявлено. В своде обследование показало, что толщина бетона верхнего свода составляет 0,6–0,65 м. Крупных областей дефектного бетона не выявлено.

Прочность бетонной обделки в тоннеле соответствует классу В15. Выбуривание образцов из бетонной обделки тоннеля для определения прочности методом определения по контрольным образцам показал, что бетон соответствует классу В20. Таким образом, прочность бетонной обделки соответствует проектным значениям. Водопроницаемость тоннельной обделки низкая, соответствует классу бетона по водонепроницаемости W2. На рис. 4 и 5 представлены примеры производимого инструментального обследования и последующей обработки данных радарограмм совместно с результатами трехмерного сканирования.

Расчеты

Статический расчет обделки выполняется по методу Метрогипротранса. Этот метод предназначен для расчета конструкции произвольного очертания, расчетную схему которого можно представить в виде плоской стержневой системы. Была выполнена серия расчетов с учетом существующих дефектов и в соответствии с актуальными нормативными документами.

Расчеты конструкции постоянной обделки были произведены согласно требованиям актуальных нормативных документов: СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные»; СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»; ВСН 193—81 «Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей»; СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [4, 8–10].

Расчеты производились на самый неблагоприятный вариант, когда конструкция воспринимает все горное давление, для сечения обделки, находящегося в наиболее неблагоприятных инженерно-геологических условиях, а именно в мергелистых глинах. Характеристики грунтов взяты по проектным чертежам. Для расчета принят коэффициент надежности по ответственности 1,1 по ГОСТ 27751—2014. Коэффициент постели принят по таблице СП122.13330.2012 $K = 20$ кгс/см³ как для твердых глин. По результатам инструментального обследования материал монолитной обделки соответствует классу бетона В20 [10, 11].

$R_{bn} = 15$ МПа — нормативное сопротивление бетона сжатию по табл. 6.7 (СП 63.13330.2018); $R_{bnt} = 1,35$ МПа — нормативное сопротивление бетона растяжению по табл. 6.7 (СП 63.13330.2018) [10].

$E_b = 27,5 \cdot 10^3$ МПа — начальный модуль деформации бетона, табл. 6.11 (СП 63.13330.2018); $E_{b,t} = 9166$ МПа модуль деформации бетона при

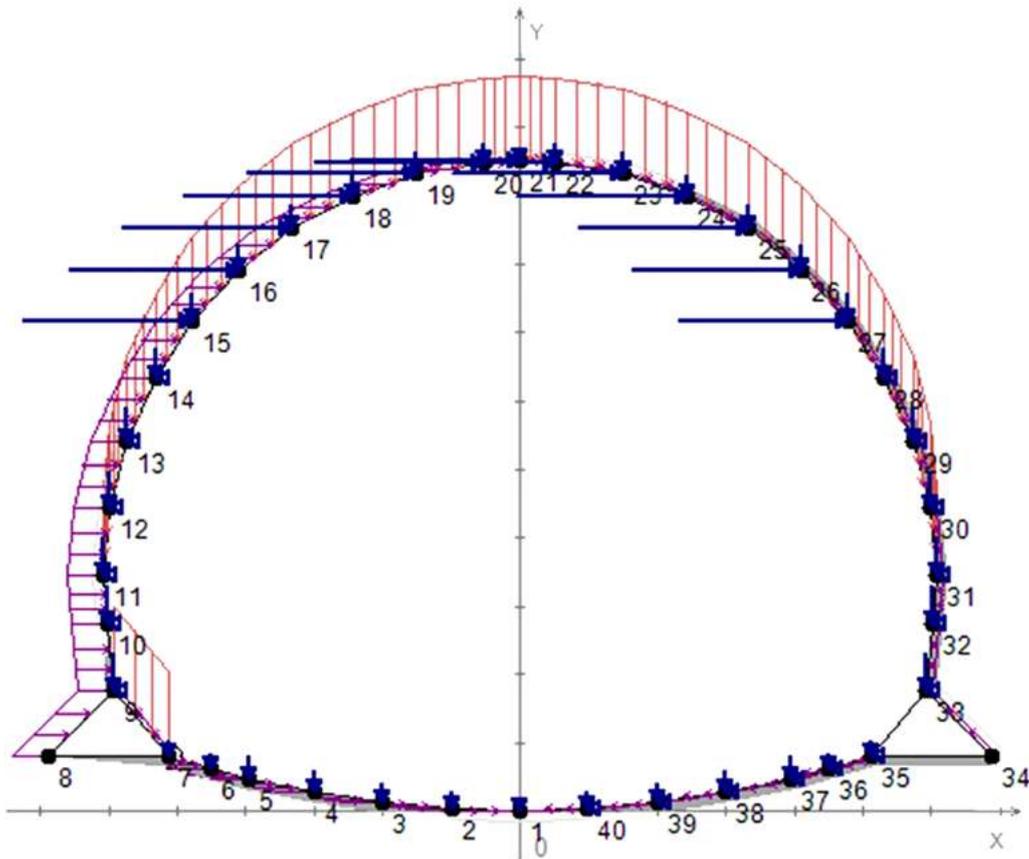


Рис. 6. Расчетная схема

продолжительном действии нагрузки, табл. 6.12, формула 6.3 (СП 63.13330.2018); $R_b = 11,5$ МПа — расчетное сопротивление бетона, табл. 6.8 (СП 63.13330.2018); $R_{bt} = 0,9$ МПа — расчетное сопротивление бетона на растяжение, табл. 6.8 (СП 63.13330.2018) [10].

Нагрузка от горного давления на конструкцию обделки тоннеля была рассчитана согласно СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автомобильные» по гипотезе сводообразования профессора Протодяконова как вес грунтов в своде обрушения [8]. По результатам аналитических расчетов получились следующие вертикальные и горизонтальные проекции нормативных воздействий:

- нормативная вертикальная нагрузка от веса грунтов в своде обрушения $q_n = 13,18$ т/м²;
- нормативная вертикальная нагрузка от собственного веса конструкции рассчитана индиви-

дуально и приложена в расчетной схеме поэлементно сосредоточенными силами;

- нормативная горизонтальная нагрузка $p_n = 2,15$ т/м².

В расчетных нагрузках также учтен коэффициент надежности по ответственности $\gamma_{fl} = 1,1$. Распределенная расчетная вертикальная нагрузка равна: $q = q_n \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 21,75$ т/м².

Распределенная расчетная горизонтальная нагрузка равна:

$p_p = p_n \cdot 0,8 \cdot 1,1 = 1,89$ т/м² — минимальное значение.

$p_p = p_n \cdot 1,2 \cdot 1,1 = 2,84$ т/м² — максимальное значение.

Нагрузка от собственного веса также учитывается с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma = 1,2$ и коэффициентом надежности по ответственности $\gamma = 1,1$.

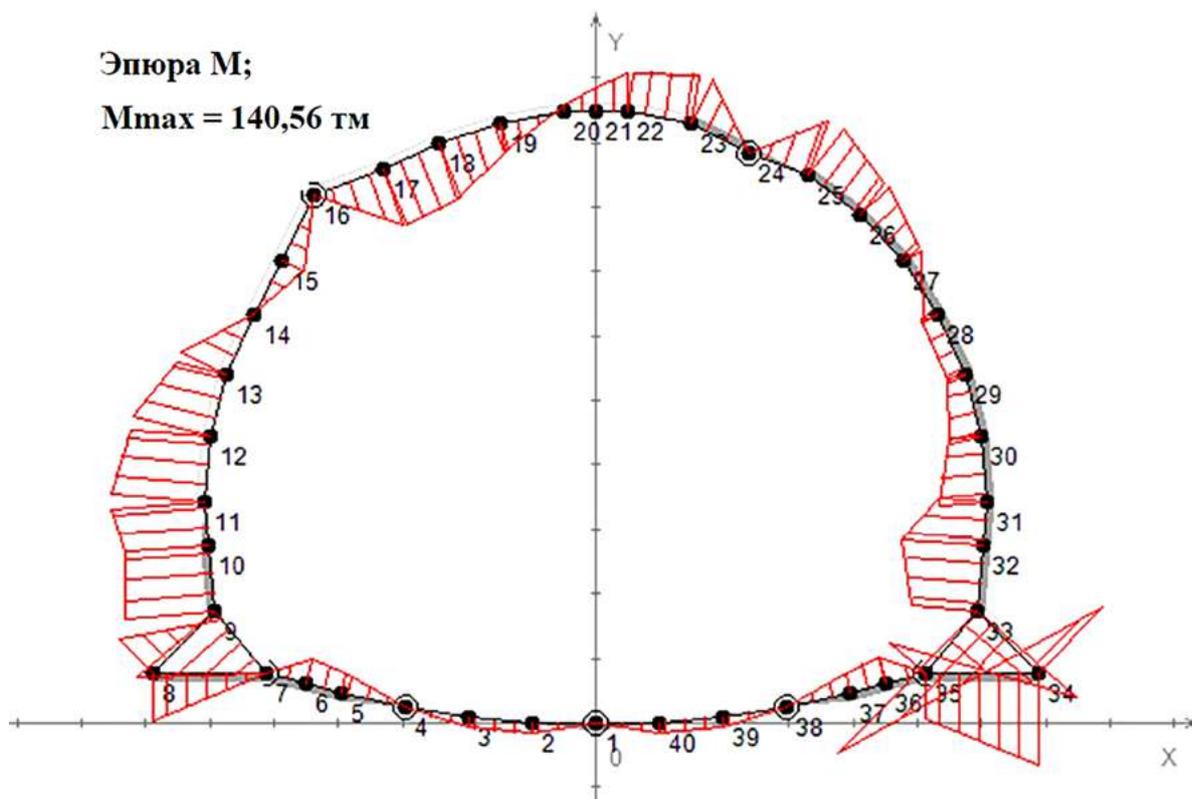


Рис. 7. Эпюра изгибающих моментов в обделке с учетом сейсмического воздействия

При подборе арматуры и проверке сечений на внецентренное сжатие вводится коэффициент условий работы 0,9 к неточности расчетной схемы в соответствии с СП «Тоннели» [8].

Задание параметров для сейсмического расчета проводилось в соответствии с п. 8 ВСН 193—81. При расчете на сейсмические нагрузки принимается начальный модуль упругости бетона [9].

Коэффициент трения бетона по глине был принят $f = 0,3$ — на основе данных табл. 142 пособия по проектированию оснований зданий и сооружений (СНиП 2.02.01—83) и табл. 17 СНиП П-22—81 «Каменные и армокаменные конструкции» [12].

Эпюра изгибающих моментов по результатам моделирования с учетом сейсмического воздействия представлена на рис. 7.

Картина перемещений и образования пластического шарнира в своде обделки показана в уве-

личенном масштабе для получения более ясной картины и представлена на рис. 8.

В обследуемом тоннеле обнаружены зоны развития пластических шарниров. Конструкция тоннеля монолитная, достижение предельных состояний подобных конструкций часто связано с образованием первого шарнира в центральной части свода, в результате возникающих растягивающих усилий в нижней части сечения возникают трещины растяжения. Подобные дефекты были обнаружены при обследовании тоннеля. Описание работы монолитной тоннельной обделки при достижении предельных состояний описаны в учебнике Храпова [13]. Дальнейшее нагружение приводит к раскрытию шарниров в четвертях свода, поскольку возникающий после сброса в своде изгибающий момент переходит на стены. В данном тоннеле практически не выявлены трещины в четвертях свода. Разумеется, трещины со стороны грунтового массива

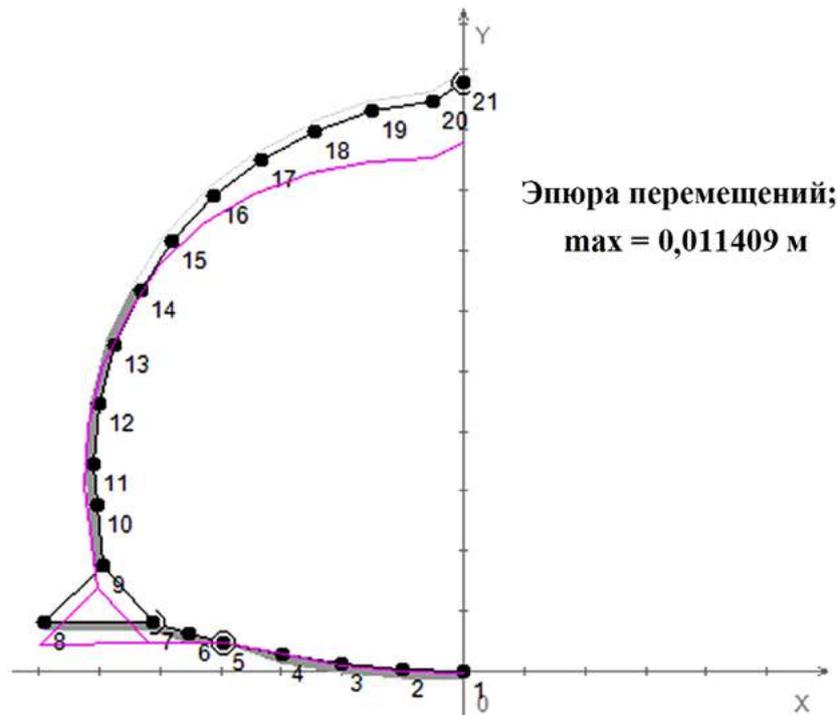


Рис. 8. Картина перемещений и образования пластического шарнира в своде обделки.
Расчет на расчетные нагрузки

невозможно определить, однако значительное раскрытие трещин будет сопровождаться сжатием бетона и, следовательно, его разрушением по внутреннему контуру обделки.

Образование трещин в четвертях свода особенно опасно для тоннельных конструкций и будет проявляться расслаиванием бетона, что будет указывать на разрушение тоннельной конструкции. Подобные ситуации не были выявлены в тоннеле Сухарный. Скорее всего, статическая работа конструкции проектировалась с учетом образования пластического шарнира в своде, что подразумевает работу конструкции по методу предельного состояния, с учетом образования первого шарнира, то есть с учетом образования трещин в своде. Подобный подход позволял отказаться от армирующих элементов.

Заключение

На основе произведенных расчетов можно сделать вывод, что тоннель находится в работо-

способном состоянии, но не выполняются требования по трещиностойкости в своде и в лотке обделки. На длительные нагрузки от горного давления обделка сохраняет свою несущую способность с образованием устойчивых трещин разрыва. При воздействии сейсмических волн места возникновения трещин растяжения могут проявляться на стенах, так как обделка не армирована. После сейсмической активности рекомендуется визуальный осмотр тоннеля, чтобы отследить образование наиболее опасных трещин от превышения сжимающих напряжений, которые будут проявляться шелушением бетона, трещинами вертикальными и наклонными под углом 45 градусов, расслоением бетона в теле обделки. Однако по результатам расчетов сечения обделки достаточно, чтобы воспринимать сжимающие напряжения после возникновения трещин растяжения.

Проведенные обследовательские работы и расчеты позволили сформулировать рекомендации по эксплуатации тоннеля Сухарный.

Для повышения несущей способности тоннельной обделки рекомендуется проведение следующих мероприятий. Устранить локальные протечки в обделке тоннеля путем нагнетания цементно-песчаного раствора за обделку и заделки трещин тампонирующими полимерными составами. Восстановление защитных слоев бетона рекомендуется выполнять с удалением слоев слабого бетона. Для заделки используют песчаный бетон или бетон с мелким щебнем, фибробетон. Трещины в бетоне рекомендуется расшить на глубину не менее 5 мм и заделать герметизирующими составами. Поверхность предварительно очищают для обеспечения адгезии с применяемым составом, совместимым с бетоном.

В случае фиксации сейсмических воздействий рекомендуется производить визуальный осмотр тоннельной обделки на наличие образования новых трещин. В случае обнаружения трещин значительного раскрытия (более 5 мм) рекомендуется установить маяки для их дальнейшего наблюдения и организовать мониторинг тоннельной обделки с привлечением специализированной организации.

Список источников

1. Лозово-Севастопольская железная дорога. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 20.01.2025).
2. Красковский Е. Я. История железнодорожного транспорта России. Т. 1: 1836–1917 гг. / Е. Я. Красковский, М. М. Уздин. — СПб., 1994. — 336 с.
3. Павлов В. Е. История железнодорожного транспорта России и Советского союза. Т. 2: 1917–1945 гг. / В. Е. Павлов, М. М. Уздин. — СПб., 1997. — 416 с.
4. СП 14.13330.2018. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7—81. Утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр. — URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/17067> (дата обращения: 20.01.2025).
5. ГОСТ Р 57208—2016. Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации. ОКС 93.060. — Введ.

01.04.2017. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141113> (дата обращения: 20.01.2025).

6. Кавказский В. Н. Оценка технического состояния подземных сооружений крупнейшей гидроэлектростанции Северного Кавказа Чиркейской ГЭС / В. Н. Кавказский, Я. В. Мельник, А. П. Лейкин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 410–420.

7. Фролов Ю. С. Опыт проходки автотранспортных тоннелей при пересечении с действующим железнодорожным тоннелем на трассе дублера курортного проспекта в г. Сочи / Ю. С. Фролов, Н. А. Коньков, Б. Д. Пеньков и др. // Метро и тоннели. — 2014. — № 1. — С. 6–10.

8. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Введ. 01.01.2013. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1911/> (дата обращения: 20.01.2025).

9. ВСН 193—81. Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей. Введ. 15.01.1982. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041138> (дата обращения: 20.01.2025).

10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Введ. 01.07.2021. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18227/> (дата обращения: 20.01.2025).

11. ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Введ. 01.07.2015. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58469/> (дата обращения: 20.01.2025).

12. СП 15.13330.2020 «СНиП П-22-81* Каменные и армокаменные конструкции». Введ. 01.07.2021. — URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117291/> (дата обращения: 20.01.2025).

13. Храпов В. Г. Тоннели и метрополитены: учебник для вузов / В. Г. Храпов, Е. А. Демешко, С. Н. Наумов и др.; под ред. В. Г. Храпова. — М.: Транспорт, 1989. — 383 с.

Дата поступления: 27.01.2025

Решение о публикации: 26.02.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru

СОЛОВЬЕВ Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук, доц.; siberian_egl@mail.ru

СОЛОВЬЕВ Роман Андреевич — главный специалист; muxairoxmail@gmail.com

Engineering Survey and Calculations of the Sukharny Tunnel on Lozovo–Sevastopol Railway

V. N. Kavkazsky¹, D. A. Soloviev¹, R. A. Soloviev²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Open Joint Stock Company Scientific Research, Design and Survey Institute Lenmetrogioprotrans, 2, Bolshaya Moskovskaya Street, St-Petersburg, 191002, Russian Federation

For citation: Kavkazsky V. N., Soloviev D. A., Soloviev R. A. Engineering Survey and Calculations of the Sukharny Tunnel on Lozovo-Sevastopol Railway // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 215–227. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-215-227

Summary

Purpose: To assess the engineering condition of the Sukharny tunnel that is an important element of the operating railway. The paper describes the inspection and verification calculations in accordance with the current regulatory requirements for transport underground structures on Lozovo-Sevastopol railway in the Crimea. **Methods:** Inspection works were performed on the Sukharny Tunnel including measuring, visual inspection and instrument-aided examination. **Results:** Based on the results of the survey, the tunnel lining parameters were specified. The lining calculations were then carried out taking into account the specified structural parameters. The range of works performed allowed making important conclusions and recommendations on the technical condition of the tunnel structures. **Practical significance:** After its opening, the Lozovo-Sevastopol railway connected the city of Simferopol with the central part of Russia, and accelerated the reconstruction of Sevastopol and the Black Sea Fleet after the Crimean War. Currently, the railway is still in operation and it is an important transportation artery connecting the city of Sevastopol with the central part of Russia. In the current geopolitical situation, it is especially important to ensure uninterrupted operation of this artery, which would be difficult without proper technical maintenance of the tunnels on this railway. Therefore, the survey and calculation works conducted, conclusions and recommendations proposed have important practical implications.

Keywords: Mountain tunnels, Crimea, survey of underground structures, engineering calculations, seismic activity.

References

1. *Lozovo-Sevastopol'skaya zheleznaya doroga* [Lozovo-Sevastopol Railway]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)
2. Kraskovskiy E. Ya., Uzdin M. M. *Istoriya zhelezno-dorozhnogo transporta Rossii. T. 1: 1836–1917 gg.* [History of railway transport in Russia. Vol. 1: 1836–1917]. St. Petersburg, 1994, 336 p. (In Russian)
3. Pavlov V. E., Uzdin M. M. *Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii i Sovetskogo soyuza. T. 2: 1917–1945 gg.* [History of railway transport in Russia and the Soviet Union. T. 2: 1917–1945]. St. Petersburg, 1997, 416 p. (In Russian)
4. *SP 14.13330.2018. Svod pravil. Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-7—81. Utv. i vveden v deystvie Prikazom Ministroya Rossii ot 24.05.2018 № 309/pr* [SP 14.13330.2018. Code of Practice. Construction in seismic areas. Updated version of SNIIP II-7—81. Approved and put into effect by Order of the Ministry of Construction of Russia dated 24.05.2018 № 309/pr]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/17067> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)
5. *GOST R 57208—2016. Tonneli i metropoliteny. Pravila obsledovaniya i ustraneniya defektov i povrezhdeniy pri ekspluatatsii. OKS 93.060. Vved. 01.04.2017* [GOST R

57208—2016. Tunnels and subways. Rules for inspection and elimination of defects and damage during operation. OKS 93.060. Introduced 01.04.2017]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200141113> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

6. Kavkazskiy V. N., Mel'nik Ya. V., Leykin A. P. et al. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy krupneyshey gidroelektrostantsii Severnogo Kavkaza Chirkeyskey GES [Assessment of the technical condition of underground structures of the largest hydroelectric power station in the North Caucasus, the Chirkeyskey HPP]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, Iss. 3, pp. 410–420. (In Russian)

7. Frolov Yu. S., Kon'kov N. A., Pen'kov B. D. Opyt prokhodki avtotransportnykh tonneley pri peresechenii s deystvuyushchim zheleznodorozhnym tonnelem na trasse dublera kurortnogo prospekta v g. Sochi [Experience of driving motor vehicle tunnels at intersections with an existing railway tunnel on the route of the Kurortny Prospekt understudy in Sochi]. *Metro i tonneli* [Metro and tunnels]. 2014, Iss. 1, pp. 6–10. (In Russian)

8. SP 122.13330.2012. *Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye*. Vved. 01.01.2013 [SP 122.13330.2012. Railway and road tunnels. Introduced on 01.01.2013]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1911/> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

9. VSN 193—81. *Instruktsiya po uchetu seismicheskikh vozdeystviy pri proektirovanii gornykh transportnykh tonneley*. Vved. 15.01.1982 [VSN 193-81. Instructions for taking into account seismic impacts in the design of mountain transport tunnels. Introduced on 15.01.1982]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200041138> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

10. SP 63.13330.2018. *Betonnnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya*. Vved. 01.07.2021 [SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Introduced on 01.07.2021]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18227/> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

11. GOST 27751—2014. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy*. Vved. 01.07.2015 [GOST 27751—2014. Reliability of building structures and foundations. Introduced on 01.07.2015]. Available at: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58469/> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

12. SP 15.13330.2020 “SNiP P-22-81* *Kamennye i armokamennye konstruksii*”. Vved. 01.07.2021 [SP 15.13330.2020 “SNiP P-22-81* Stone and reinforced stone structures”. Introduced on 01.07.2021]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117291/> (accessed: January 20, 2025). (In Russian)

13. Khrapov V. G., Demeshko E. A., Naumov S. N. et al. *Tonneli i metropoliteny: uchebnik dlya vuzov* [Tunnels and subways: a textbook for universities]. Moscow: Transport Publ., 1989, 383 p. (In Russian)

Received: January 27, 2025

Accepted: February 26, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZKY — PhD in Engineering, Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru

Dmitry A. SOLOVIEV — PhD in Engineering, Associate Professor; siberian_egl@mail.ru

Roman A. SOLOVIEV — Chief Specialist; myxairoxmail@gmail.com

УДК 625.1:628.2

Об особенностях гидравлического расчета фильтрующих насыпей в связных грунтах

В. И. Штыков¹, А. Б. Пономарев¹, Ю. Г. Янко²

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

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б., Янко Ю. Г. Об особенностях гидравлического расчета фильтрующих насыпей в связных грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 228–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-228-237

Аннотация

Цель: Создать методику гидравлического расчета фильтрующих насыпей, учитывающую новые результаты исследований расчета размывающих скоростей фильтрации в каменной наброске на контакте с окружающими грунтами, а также связь между фильтрационными свойствами геотекстильных материалов в мерзлом состоянии и их коэффициентом водоотдачи. **Методы:** Для определения размывающей скорости на контакте крупного камня с глинистым грунтом предложено использовать формулу ВНИИГ. Для проверки геотекстиля на фильтрующую способность в мерзлом состоянии используются результаты исследований коэффициентов водоотдачи. **Результаты:** Зависимость для расчета размывающей скорости грунтов на контакте с крупнозернистыми материалами получена именно для фильтрующих сооружений, а не для случая открытых потоков (в актуализированных ВСН 61—89 эти рекомендации остались без изменения), поэтому она дает более обоснованные результаты, детально учитывающие характеристики грунтов и крупнозернистых материалов. Так как фильтрующие насыпи располагаются в деятельном слое грунтов, то целесообразно, чтобы в применяемых в них для разделительных слоев геотекстильных материалах учитывался коэффициент водоотдачи, существенно влияющий на их способность фильтровать, находясь еще в мерзлом состоянии. **Практическая значимость:** Предложенная методика гидравлического и фильтрационного расчета фильтрующих насыпей позволит более обоснованно проектировать для них защитные мероприятия, исключая возможность возникновения размывов.

Ключевые слова: Фильтрующие насыпи, гидравлический расчет фильтрующих насыпей, защита от размывов откосов, фильтрационные свойства геотекстилей в мерзлом состоянии, коэффициент водоотдачи.

Введение

Фильтрующие насыпи относятся к типу бесполостных дренажей в теле водопропускных сооружений и нашли применение при строительстве железных дорог в районах вечной мерзлоты, а также в гидротехническом и мелиоративном строительстве [1–3]. Вопросы проектирования и строительства фильтрующих насыпей рассмотрены в

ВСН 61—89, которые были актуализированы в 2020 году. В этих нормах прописана рекомендуемая область применения фильтрующих насыпей, в частности в пределах равнинных участков вместо мостов и водопропускных труб [4], где вблизи имеются запасы камня морозостойких пород.

В публикациях [1] и [4] речь идет об укреплении только горизонтальных участков, прежде всего dna и верха фильтрующих насыпей, однако из теории

фильтрации известно, что скорости фильтрации одинаковы во всех точках одного и того же живого сечения фильтрационного потока. То есть по всему периметру соприкосновения каменной наброски (заполнителя фильтрующей насыпи) в рассматриваемом живом сечении с окружающим грунтом скорости одинаковы. При этом скорость движения фильтрационного потока, при которой начинается размыв окружающего грунта на выходе из сооружения v_p , определяется по формуле:

$$v_p = 1,9 \frac{Q}{\omega n}, \quad (1)$$

где n — пористость каменной наброски;

Q — фильтрационный расход, м³/с;

ω — площадь поперечного сечения фильтрующей насыпи, м².

Из зависимости (1) следует, что размывающая скорость принимается по величине в 1,9 раза больше скорости фильтрации воды в рассматриваемом живом сечении фильтрующей насыпи, то есть 1,9 — это коэффициент запаса. Далее следует рекомендация, что тип укрепления русла принимается по нормам для открытых русел.

Методы исследования

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, выполненные во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и нами [5–7], процесс размыва связных грунтов при фильтрации существенно сложнее, чем в случае открытых потоков.

Итогом выполненных исследований явилось получение следующей зависимости для расчета размывающей скорости [7]:

$$v_{er} = 4,3 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-6,67 \frac{W_s}{W_f}\right) n \cdot v \sqrt{\frac{d_{17}}{d_u^3}}, \quad (2)$$

где W_s и W_f — влажность грунта по массе, соответствующая его полному насыщению и на границе текучести;

v — кинематический коэффициент вязкости воды, см²/с;

d_{17} — диаметр материала заполнителя, мельче которого в его составе содержится 17 % частиц по массе, см;

d_u — расчетное значение диаметра фильтрационного хода заполнителя, см.

Из формулы (2) следует, что размывающая скорость зависит как от свойств грунта, так и от крупности материала заполнителя. Из нее также следует, и это подтверждено опытами, что для одного и того же грунта размывающая скорость для разных по крупности материалов будет отличаться. Раньше, в том числе и в актуализированных ВСН 61—89, это обстоятельство никак не учитывалось.

В ВСН 61—89 для защиты верха фильтрующей насыпи рекомендуются к применению геотекстильные материалы. Накопленный опыт их применения, в том числе для разделения балластного слоя, позволяет судить о том, достаточно ли полно общепринятые по состоянию на сегодняшний день требования, предъявляемые к геотекстильным материалам, учитывают условия их работы в тех или иных сооружениях. В частности, как минимум верх фильтрующих насыпей располагается в деятельном слое. Каменная наброска, служащая заполнителем фильтрующих насыпей, к весне свободна ото льда. Геотекстиль, разделяющий каменную наброску от расположенного сверху грунта, может находиться в мерзлом состоянии, и, несмотря на это, в случае необходимости он не должен препятствовать фильтрации поступающей к нему сверху воды.

Ранее нами было установлено [8], что при промерзании геотекстильных материалов в них образуется тем меньше льда, чем больше его коэффициент водоотдачи. Однако по состоянию на сегодняшний день в паспортных данных геотекстильных материалов отсутствуют такие важные данные, как коэффициент водоотдачи. Значе-

Таблица 1. Коэффициенты фильтрации некоторых марок геотекстиля в мерзлом (влажноссыщенном) и оттаявшем состояниях от коэффициента водоотдачи

Марка геотекстиля	Пористость	Коэффициент водоотдачи	Коэффициент фильтрации при состоянии геотекстиля, м/сут	
			Оттаявший	Мерзлый
Polyfelt TS-10	0,87	0,01	227	0,00
Polyfelt TS-20	0,88	0,35	253	1,05
Polyfelt TS-30	0,82	0,68	283	30,51
Polyfelt TS-60	0,82	0,37	193	6,09
Турар SF-27	0,76	0,63	123	16,10
Турар SF-40	0,68	0,49	44	4,02
Пинема	0,89	0,78	210	27,50

ния этого коэффициента необходимо для каждого материала определять в лаборатории [8].

В табл. 1 приведены коэффициенты фильтрации некоторых марок геотекстильных материалов в мерзлом состоянии.

Опыты показывают, что приемлемые значения коэффициента фильтрации показывают геотекстильные материалы с коэффициентом водоотдачи (при температуре 20 °С) не менее 0,65 при пористости не менее 0,8 [9]. Эти материалы способны отводить воду от земляного полотна в период снеготаяния, когда лед внутри них еще не растаял. В таблице обращает на себя внимание тот факт, что у одной и той же марки геотекстиля (Polyfelt) коэффициенты водоотдачи неодинаковы. По мнению авторов статьи, это может быть обусловлено различиями в составе волокон геотекстиля, хотя он и изготавливается по единой технологии.

Величину коэффициента фильтрации геотекстиля в мерзлом состоянии K_f при известных величинах его коэффициента фильтрации в исходном состоянии K_t и коэффициенте водоотдачи μ можно определить по формуле (3) [9]:

$$K_f = K_t \frac{n_e (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_e})^2 (1-n_g) (d'_p)^2}{n_g (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_g})^2 (1-n_e) d_p^2}, \quad (3)$$

$$n_e = n_g - \frac{W_{gf} \rho_g}{\rho_i}, \quad (4)$$

$$d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4W_{gf} \rho_g}{\pi \rho_i}}}, \quad (5)$$

где n_g — пористость геотекстиля;

n_e — условная «эффективная» пористость геотекстиля, остающаяся после замерзания воды в материале;

W_{gf} — влажность геотекстиля перед промерзанием по массе;

ρ_g — плотность геотекстиля, г/см³;

ρ_i — плотность льда, г/см³;

d_p и d'_p — диаметр волокон геотекстиля в исходном и замороженном состоянии (увеличенный за счет намерзшего льда) соответственно, см.

Течениям воды в фильтрующих элементах подобного типа посвящен ряд статей в иностранных изданиях [10–15], однако они приводят разрозненные данные преимущественно о структуре потока в самой наброске и не занимаются в достаточной степени вопросами размыва. Работа [10] подходит к решению вопроса ближе всего, но ее данные недостаточны для создания расчетной методики нашего случая.

Гидравлический расчет фильтрующей насыпи с учетом полученной за прошедший период после разработки ВСН 61—89 дополнительной новой информации, не включенной в актуализированное в 2020 году издание, лучше всего рассмотреть на примере. Начнем с фильтрационного расчета потока внутри фильтрующей насыпи.

Для проектирования фильтрующих насыпей необходимо знать: расход воды Q ; морфологию русла и поймы притока; характерные размеры насыпи; виды подверженных действию воды грунтов; характеристики камня, который будет выполнять функцию фильтрации. Рекомендуемая крупность камня 0,2–0,4 м.

Результаты исследований

Рассмотрим случай безнапорного течения в фильтрующей насыпи. Уклон дна в пределах земляного полотна равен нулю. Расход $Q = 3 \text{ м}^3/\text{с}$. Высота земляного полотна до бровки $H_e = 4 \text{ м}$; ширина основной площадки $b = 6 \text{ м}$; $m = 1,5$; в основании залегает тяжелый суглинок; камень наброски имеет угловатую форму и средний диаметр 45 см; пористость наброски $n = 0,5$.

Расчетная схема показана на рис. 1.

Гидравлический расчет фильтрующей насыпи

1. Определяем длину L (см. рис. 1).

$$\begin{aligned} L &= b + 2 \cdot H_e m - h_w m = \\ &= 6 + 2 \cdot 4 \cdot 1,5 - 2 \cdot 1,5 = 15 \text{ м}, \end{aligned}$$

где h_w — глубина воды перед фильтрующей насыпью.

2. Высоту фильтрующей насыпи со стороны верхового откоса принимаем равной 2,5 м.

3. В первом приближении величину гидравлического уклона фильтрационного потока I_0 определяем по формуле:

$$I_0 = \frac{h_w}{L} = \frac{2}{15} = 0,133. \quad (6)$$

4. При заданном расходе Q определяем для некоторого среднего сечения фильтрационного потока площадь живого сечения ω :

$$\omega = \frac{Q}{K \sqrt{I_0}}, \quad (7)$$

где K — коэффициент фильтрации каменной наброски в теле фильтрующей насыпи, значения которого можно принимать по табл. 2 приложения 11 ВСН 61—89. В рассматриваемом случае $K = 66 \text{ см/с}$.

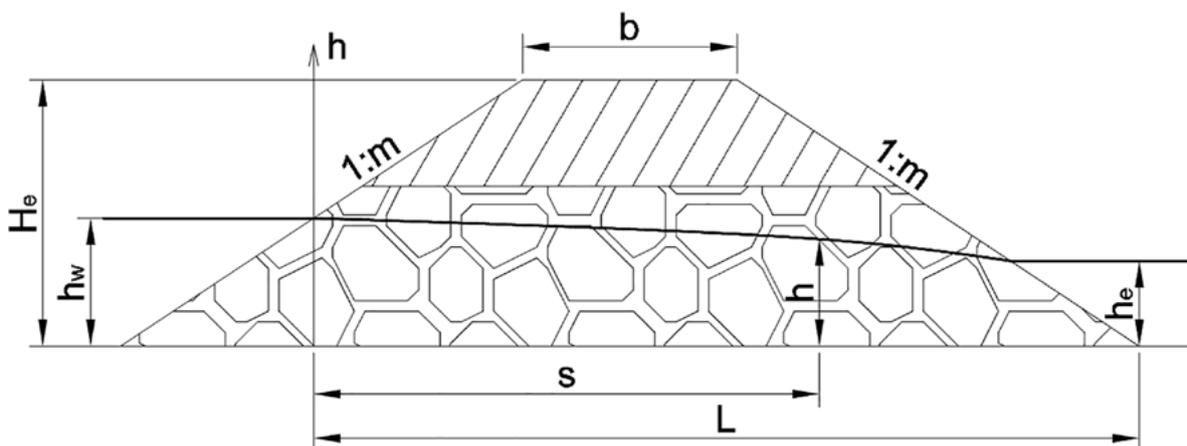


Рис. 1. Схема безнапорной фильтрующей насыпи

$$\omega = \frac{3}{0,66\sqrt{0,133}} = 12,45 \text{ м}^2.$$

5. Рассчитаем ширину фильтрующей насыпи по низу b_b для входного сечения, где $h_w = 2$ м из формулы:

$$\omega = (b_b + m_e \cdot h_w) h_w, \quad (8)$$

где m_e — коэффициент откоса фильтрующей насыпи в поперечном ее сечении, принимается равным 1,5.

Из формулы (8) после подстановки известных величин получаем $b_b = 3,3$ м.

6. Для случая, когда продольный уклон дна фильтрационного потока равен нулю, можно получить точное решение для трапецеидального живого сечения.

Исходное дифференциальное уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{dh}{ds} = -\frac{Q^2}{K^2 \omega_s^2}, \quad (9)$$

где h — глубина фильтрационного потока в рассматриваемом поперечном сечении, м;

s — расстояние от начального живого сечения фильтрующей насыпи до рассматриваемого сечения, м;

ω_s — площадь рассматриваемого живого сечения, м².

Выразим в формуле (9) ω_s и проинтегрируем полученное выражение:

$$\int_{h_w}^{h_e} (b_b + m_e h)^2 h^2 dh = -\frac{Q^2}{K^2} \int_0^L ds, \quad (10)$$

Из выражения (10) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{b_b^2 (h_w^3 - h_e^3)}{3} + \frac{m_e b_b (h_w^4 - h_e^4)}{4} + \frac{m_e^2 (h_w^5 - h_e^5)}{5} = \\ = \frac{Q^2 L}{K^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где h_e — глубина фильтрационного потока на выходе из фильтрующей насыпи.

В выражении (11) неизвестно h_e , оно и вычисляется при решении уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{3,3^2 (2^3 - h_e^3)}{3} + \frac{1,5 \cdot 3,3 (2^4 - h_e^4)}{4} + \\ + \frac{1,5^2 (2^5 - h_e^5)}{5} = \frac{3^2 15}{0,66^2}. \end{aligned}$$

Получаем $h_e = 1,67$ м.

Для построения депрессионной поверхности фильтрационного потока на рис. 1 используем уравнение (11) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{b_b^2 (h_w^3 - h^3)}{3} + \frac{m_e b_b (h_w^4 - h^4)}{4} + \frac{m_e^2 (h_w^5 - h^5)}{5} = \\ = \frac{Q^2 s}{K^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где h и s соответственно глубина и продольная координата фильтрационного потока в живом сечении (рис. 1).

Выше уже говорилось о том, что защита от размыва фильтрационным потоком должна рассчитываться иначе, чем это рекомендуется ВСН 61—89. В случае безнапорной фильтрации защищаться должны верх, откосы и основание фильтрующей насыпи. Поперечный разрез насыпи показан на рис. 2. В рассматриваемом случае для защиты от размывов дна и откосов может вполне подойти щебень, который используется для устройства балластной призмы. Исходные данные: диаметр материала заполнителя, мельче которого в его составе содержится 17% частиц по массе $d_{17} = 2,2$ см; коэффициент неоднородности $\eta = 3,5$; $n = 0,48$; коэффициент формы частиц $\psi = 1,68$; кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 0,0131$ см²/с; коэффициент Шези $C_0 = 70$ (см)^{0,5}/с. Грунт — тяжелый суглинок: $W_s = 0,160$, $W_f = 0,224$; толщину защитного слоя в основании фильтрующей насыпи и на откосах примем равной 0,4 м.

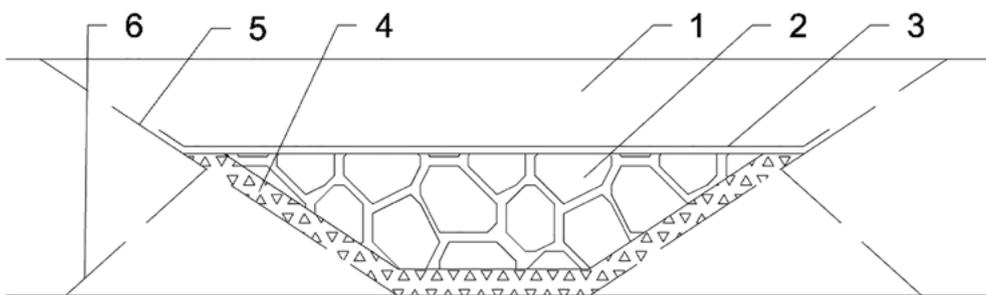


Рис. 2. Поперечный разрез фильтрующих насыпей в связных грунтах:
 1 — земляное полотно; 2 — каменная наброска; 3 — геотекстиль; 4 — защитный слой;
 5 — откосы подходов участка земляного полотна; 6 — откосы оголовков фильтрующей части сооружения

Фильтрационный расчет на устойчивость к размыву на границе защитного слоя

1. Определяем скорость фильтрации в защитном слое для некоторого среднего сечения, расположенного между входным и выходным сечениями фильтрующей насыпи. Движение фильтрационного потока является плавно изменяющимся. Следовательно, живые сечения являются плоскими и вертикальными и во всех точках одного и того же живого сечения пьезометрический уклон одинаков. Однако скорости фильтрации в каменной наброске в каждом живом сечении при одной и той же величине пьезометрического уклона будут существенно превышать скорости фильтрации в защитном слое. Поскольку нами уже определена глубина фильтрационного потока на выходе из фильтрующей насыпи, то представляется возможность уточнить среднее значение пьезометрического уклона и, соответственно, более точно вычислить среднее значение скорости фильтрации в защитном слое:

$$I_0^m = \frac{h_w - h_e}{L} = \frac{2,0 - 1,67}{15} = 0,022,$$

$$v_{pl} = K_{pl} \sqrt{I_0^m}, \quad (13)$$

где K_{pl} — коэффициент фильтрации защитного слоя при турбулентном режиме, см/с;

v_{pl} — скорость фильтрации в защитном слое, вычисленная для некоторого среднего между входным и выходным сечениями фильтрационного потока в фильтрующей насыпи, см/с.

$$K_{pl} = \frac{n C_0}{\pi^2} \sqrt{2d_u}, \quad (14)$$

где n — пористость щебня, из которого выполнен защитный слой;

C_0 — коэффициент Шези, см^{0,5}/с;

d_u — расчетное значение диаметра фильтрационного хода, см.

$$d_u = 0,57 \sqrt[5]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi}. \quad (15)$$

Подставляя последовательно в формулы (13)–(15) заданные выше величины, получаем: $d_u = 0,85$ см; $K_{pl} = 8,24$ см; $v_{pl} = 1,22$ см/с.

2. По зависимости (2) вычисляем величину размывающей скорости фильтрации для окружающего грунта на контакте с щебнем заданной крупности: $v_{er} = 4,3$ см/с.

Так как полученная скорость v_{er} больше фактической величины скорости фильтрации в защитном слое v_{pl} , то размывов не будет.

Поскольку фильтрующие насыпи применяются, как правило, на равнинных участках и имеют небольшую высоту, то верх ее контакти-

рует либо с балластной призмой, либо с грунтом земляного полотна. В статье мы рассматриваем лишь связные грунты. Исходные данные по крупности камня, который является заполнителем фильтрующей насыпи, и грунту земляного полотна остаются прежними. Расчеты по определению диаметра фильтрационных ходов в каменной наброске показали, что в зависимости от степени неоднородности камней по крупности диаметр фильтрационных ходов изменяется от 8 до 12 см, то есть при вибродинамической поездной нагрузке щебень будет просыпаться внутрь фильтрующей насыпи. По этой же причине даже в случае безнапорных насыпей суглинок будет отслаиваться и крошиться на контакте с камнями. Поэтому здесь в качестве разделительного слоя целесообразно применение геотекстиля.

Как уже говорилось выше, целесообразно, чтобы геотекстильный материал, находясь еще в мерзлом состоянии, был способен пропускать через себя воду, поступающую к нему сверху из оттаявшей части земляного полотна. Коэффициент водоотдачи не указывается в паспортных данных геотекстиля. Его можно определить в лабораторных условиях либо при использовании данных полевых обследований по установлению количества воды, содержащейся в порах геотекстильного материала к моменту его промерзания, или льда уже после промерзания.

Исходные данные: для защиты фильтрующей насыпи сверху используется геотекстильный материал Polyfelt TS-30, $n_g = 0,82$; $K_t = 283$ м/сут. Льдистость после промерзания i_0 составила 0,15.

$$n_e = n_g - \frac{W_{gf} \rho_g}{\rho_i} = n - i_0 = 0,82 - 0,15 = 0,67.$$

Из (5) следует, что

$$\left(\frac{d'_p}{d_p}\right)^2 = \frac{1}{1 - \frac{4}{\pi} i_0} = \frac{1}{1 - \frac{4}{3,14} 0,15} = 1,24;$$

$$K_f = K_t \frac{n_e (\sqrt{\pi} - \sqrt{1 - n_e})^2 (1 - n_g)}{n_g (\sqrt{\pi} - \sqrt{1 - n_g})^2 (1 - n_e)} \left(\frac{d'_p}{d_p}\right)^2 =$$

$$= 124 \text{ м/сут.}$$

Если бы мы выбрали геотекстильный материал марки Polyfelt TS-20, то из-за малого коэффициента водоотдачи его $K_f = 40$ м/сут. Таким образом, при промерзании он ведет себя значительно хуже.

Заключение

Фильтрующие насыпи нашли применение при строительстве железных дорог в районах с вечной мерзлотой. В 2020 году были актуализированы ВСН 61—89, в которых рассмотрены вопросы проектирования этих сооружений. Однако в них не были учтены полученные за последние годы результаты исследований по размывающим скоростям грунтов при фильтрации и изменению фильтрационных свойств геотекстилей в результате их промерзания.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями было установлено, что размывающая скорость при фильтрации зависит не только от свойств грунта, но и от крупности материала заполнителя фильтрующего сооружения, контактирующего с грунтом. Для расчета размывающей скорости в основании и откосах фильтрующих сооружений предложена расчетная зависимость, учитывающая перечисленные выше характеристики грунта и заполнителя фильтрующей насыпи.

Установлено, что фильтрационные свойства геотекстильных материалов в мерзлом состоянии зависят от коэффициента водоотдачи. Поскольку он размещается, как правило, в деятельном слое, то целесообразно, чтобы еще до оттаивания геотекстильный материал был способен пропускать внутрь фильтрующей насыпи поступающую к нему воду из вышерасположенного оттаявшего слоя.

Рассмотрен пример полного гидравлического и фильтрационного расчета как в целом фильтрующей насыпи, так и отдельных ее частей с учетом последних результатов исследований по расчету размывающих скоростей при фильтрации на контакте крупнозернистых материалов с грунтами и зависимости фильтрационных свойств геотекстильных материалов в мерзлом состоянии от их коэффициента водоотдачи.

Список источников

1. Bogomolova N. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov et al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*, Saint Petersburg, April 15–22, 2019. — Vol. 2. — Singapore: Springer Nature, 2019. — Pp. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
2. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостного пластового дренажа при грунтовом напорном питании / В. И. Штыков, А. В. Козлова // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 2007. — Т. 247. — С. 84–90.
3. Штыков В. И. Бесполостной дренаж периодического профиля / В. И. Штыков, Ю. Г. Янко // *Мелиорация и водное хозяйство*. — 2009. — № 4. — С. 35–37.
4. ВСН 61—89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты / ЦНИИС Минтрансстрой СССР. — М.: ЦНИИС, 1990. — 208 с.
5. Жиленков В. Н. Гидродинамические условия контактного размыва глинистых грунтов фильтрационным потоком / В. Н. Жиленков, Н. И. Шевченко // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 1980. — Т. 144. — С. 11–19.
6. Жиленков В. Н. О сопротивляемости глинистых грунтов контактному размыву фильтрующим потоком / В. Н. Жиленков, Н. И. Шевченко // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 1981. — Т. 146. — С. 55–67.
7. Штыков В. И. О расчете размывающих скоростей при проектировании фильтрующих сооружений в связных грунтах / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2021. — Т. 18. — № 2. — С. 303–312. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-303-312.
8. Штыков В. И. О дополнительных требованиях, предъявляемых к защитно-фильтрующим материалам закрытых дренажей при заложении их в зоне сезонного промерзания грунтов / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев // *Инженерно-строительный журнал*. — 2012. — № 4(30). — С. 39–45. — DOI: 10.5862/МСЕ.30.6.
9. Гулюк Г. Г. Руководство по мелиорации полей / Г. Г. Гулюк, Ю. Г. Янко, В. И. Штыков и др. — СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2020. — 219 с. — DOI: 10.25695/k9292-1099-3543-i.
10. Yan H. Modelling the effects of water chemistry and flowrate on clay erosion / H. Yan, M. Sedighi, A. Jivkov // *Engineering Geology*. — 2021. — Vol. 294. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106409.
11. Siddiqua S. Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill / S. Siddiqua, J. A. Blatz, N. C. Privat // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 2011. — Vol. 137. — Iss. 11. — Pp. 1462–1469. — DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000442.
12. Smith N. S. Numerical Modeling of the Effects of Toe Configuration on Throughflow in Rockfill Dams / N. S. Smith, G. H. R. Ravindra, F. G. Sigtryggisdóttir // *Water*. — 2021. — Vol. 13. — P. 1726. — DOI: 10.3390/w13131726.
13. Ferdos F. Hydraulic Conductivity of Coarse Rockfill used in Hydraulic Structures / F. Ferdos, A. Wörman, I. Ekström // *Transport in Porous Media*. — 2015. — Vol. 108. — Pp. 367–391. — DOI: 10.1007/s11242-015-0481-1.
14. Martins R. Turbulent seepage flow through rockfill structures / R. Martins // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. — March 1990. — Vol. 42. — Iss. 3. — Pp. 41–45. — DOI: 10.1016/0148-9062(90)90640-N.

15. Bonelli S. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees / S. Bonelli, F. Nicot // Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. — 2013. — 388 p. — DOI: 10.1002/9781118577165.

Дата поступления: 31.01.2025

Решение о публикации: 26.02.2025

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович — чл.-корр. РАН,

д-р техн. наук, проф.; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук,

доц.; pol1nom@yandex.ru

ЯНКО Юрий Григорьевич — канд. техн. наук;

yanko@agrophys.ru

Specifics of Rockfill Dam Hydraulic Calculations in Clay Soils

V. I. Shtykov¹, A. B. Ponomarev¹, Yu. G. Yanko²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky pr., Saint-Petersburg. 195220, Russian Federation

For citation: Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G. Specifics of Rockfill Dam Hydraulic Calculations in Clay Soils // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 228–237. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-228-237

Summary

Purpose: To develop a rockfill dam hydraulic calculation method based on the latest research on filtration erosion rate in coarse-grained materials at the contact with surrounding soils as well as the dependence of the geotextile filtration properties in the frozen state on its water loss coefficient. **Methods:** The erosion rate at the contact of coarse-grained materials with clay soils is proposed to be calculated by the formula developed at the Vedeneev All-Russia Institute of Hydraulic Engineering. The geotextile filtration properties in the frozen state have been tested using the water loss coefficient of these materials. **Results:** The proposed dependence for calculating the erosion rate of soils at the contact with coarse-grained materials has been obtained specifically for filtration facilities. It is not designed for open flows (in the updated VSN 61-89 Construction Norms, these recommendations remained unchanged); therefore, it provides more substantiated results taking into account soils and coarse-grained material properties. Since filtering embankments are built in the soils prone to climate-induced variability, the geotextile material separating layers should be calculated taking into account the water-loss coefficient that significantly affects their ability to filter, especially in their frozen state. **Practical significance:** The proposed method of hydraulic and filtration calculation of filtering embankments will allow designing more adequate protective measures for eliminating erosion.

Keywords: Filtering embankments, hydraulic calculation of filtering embankments, protection against slope erosion, filtration properties of geotextiles in a frozen state, water-loss coefficient.

References

1. Bogomolova N., Milyushkan Y., Shkurnikov S. et al. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way”. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*, Saint Petersburg,

April 15–22, 2019, vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.

2. Shtykov V. I., Kozlova A. V. *Gidravlicheskiy raschet bespolostnogo plastovogo drenazha pri gruntovom napornom pitanii* [Hydraulic calculation of cavity-free formation drainage with ground pressure feeding]. *Izvestiya*

Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 2007, vol. 247, pp. 84–90. (In Russian)

3. Shtykov V. I., Yanko Yu. G. Bespolostnoy drenazh periodicheskogo profilya [Cavity-free drainage of a periodic profile]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land reclamation and water management]. 2009, Iss. 4, pp. 35–37. (In Russian)

4. *VSN 61—89. Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznykh dorog v rayonakh vechnoy merzloty. TsNIIS Mintransstroya SSSR* [VSN 61—89. Surveys, design and construction of railways in permafrost areas. TsNIIS Mintransstroy USSR]. Moscow: TsNIIS Publ., 1990, 208 p. (In Russian)

5. Zhilenkov V. N., Shevchenko N. I. Gidrodinamicheskie usloviya kontaktnogo razmyva glinistykh gruntov fil'tratsionnym potokom [Hydrodynamic conditions of contact erosion of clay soils by filtration flow]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 1980, vol. 144, pp. 11–19. (In Russian)

6. Zhilenkov V. N., Shevchenko N. I. O soprotivlyaemosti glinistykh gruntov kontaktnomu razmyvu zhil'tratsionnym potokom [On the resistance of clay soils to contact erosion by filtration flow]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 1981, vol. 146, pp. 55–67. (In Russian)

7. Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G. O raschete razmyvayushchikh skorostey pri proektirovanii fil'truyushchikh sooruzheniy v svyaznykh gruntakh [On the calculation of erosion velocities in the design of filter structures in cohesive soils]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 2, pp. 303–312. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-303-312. (In Russian)

8. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. O dopolnitel'nykh trebovaniyakh, pred'yavlyayemykh k zashchitno-fil'truyushchim materialam zakrytykh drenazhey pri zalozhenii ikh v zone sezonnogo promerzaniya gruntov [On additional requirements for protective and filtering materials of closed drainage systems when laying them in the zone of seasonal soil freezing]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil

Engineering Journal]. 2012, Iss. 4(30), pp. 39–45. DOI: 10.5862/MCE.30.6. (In Russian)

9. Gulyuk G. G., Yanko Yu. G., Shtykov V. I. et al. *Rukovodstvo po melioratsii poley* [Field Reclamation Guide]. St. Petersburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiiy universitet Petra Velikogo" Publ., 2020, 219 p. DOI: 10.25695/k9292-1099-3543-i. (In Russian)

10. Yan H., Sedighi M., Jivkov A. Modelling the effects of water chemistry and flowrate on clay erosion. *Engineering Geology*, 2021, vol. 294. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106409.

11. Siddiqua S., Blatz J. A., Privat N. C. Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, vol. 137, Iss. 11, pp. 1462–1469. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000442.

12. Smith N. S., Ravindra G. H. R., Sigtryggssdóttir F. G. Numerical Modeling of the Effects of Toe Configuration on Throughflow in Rockfill Dams. *Water*. 2021, vol. 13, p. 1726. DOI: 10.3390/w13131726.

13. Ferdos F., Wörman A., Ekström I. Hydraulic Conductivity of Coarse Rockfill used in Hydraulic Structures. *Transport in Porous Media*, 2015, vol. 108, pp. 367–391. DOI: 10.1007/s11242-015-0481-1.

14. Martins R. Turbulent seepage flow through rockfill structures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. March 1990, vol. 42, Iss. 3, pp. 41–45. DOI: 10.1016/0148-9062(90)90640-N.

15. Bonelli S., Nicot F. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 2013, 388 p. DOI: 10.1002/9781118577165.

Received: January 31, 2025

Accepted: February 26, 2025

Author's information:

Valeriy I. SHTYKOV — Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrey B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor; pollnom@yandex.ru

Yuriy G. YANKO — PhD in Engineering; yanko@agrophys.ru

УДК 691.328.4

Экспериментально-аналитическая оценка возможности применения композитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сплошного сечения

А. В. Бенин¹, О. Ю. Беляев², Е. Р. Богданова¹, Р. Крист³, Ю. Ю. Курятников⁴

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

²ООО «Композит Групп Челябинск», Российская Федерация, 454047, Челябинск, ул. 2-я Павелецкая, 36, корп. 1

³Университет побережья, Колумбия, 080002, Барранкилья, 58-я улица, 55-66

⁴Тверской государственный технический университет, Российская Федерация, 170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22

Для цитирования: Бенин А. В., Беляев О. Ю., Богданова Е. Р., Крист Р., Курятников Ю. Ю. Экспериментально-аналитическая оценка возможности применения композитной арматуры для армирования забивных свай квадратного сплошного сечения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 238–251. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-238-251

Аннотация

Цель: Рассмотреть возможность применения композитной арматуры в конструкции забивных свай квадратного сечения. **Методы:** Произведены аналитические и экспериментальные исследования влияния типа используемой в бетонных забивных сваях арматуры на прочность и жесткость при разгрузке. **Результаты:** В статье приведены результаты расчетов коэффициентов запаса кратковременной прочности бетонных забивных свай, армированных стеклопластиковой композитной арматурой, при их транспортировке. Установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации при вдавливании сваи. Представлены результаты опытной забивки свай, армированных композитной арматурой. **Практическая значимость:** Установлено, что сваи, армированные композитной арматурой, по своим свойствам не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой. Определен экономический эффект от замены традиционной металлической арматуры на композитную арматуру, выражающийся в снижении стоимости конечного продукта (свай).

Ключевые слова: Бетонные забивные сваи, композитная арматура, запас прочности, математическое моделирование, конечно-элементное моделирование, экспериментальные исследования, опытная забивка свай, экономический эффект.

Введение

Технология применения свай в грунтах при возведении зданий и сооружений с целью решения различных геотехнических задач известна с глубокой древности. На данный момент в практике строительства применяется более 150 типов свай, но наибольшее распространение получили забивные сваи сплошного квадратного сечения, применение

которых позволяет существенно сократить трудоемкость и стоимость, а также уменьшить сроки проведения строительных работ. Традиционно сваи армируются металлической арматурой, стоимость которой существенно влияет на стоимость конечного изделия (свай). Одним из способов уменьшения стоимости свай может быть замена металлической арматуры на композитную, напри-

мер стеклопластиковую полимерную арматуру (далее — СПА). Однако, учитывая, что отливка бетонных свай осуществляется на производстве, возникает необходимость транспортировки готового изделия на строительную площадку. Транспортировка бетонных свай увеличивает риск появления механических повреждений в готовом изделии, приводящих к зарождению трещин, сколов, обнажающих армирующий каркас. Замена металлической арматуры на композитную повышает деформативность свай, что увеличивает вероятность появления трещин при транспортировке, погрузо-разгрузочных работах и забивке свай. Наличие в бетонной свае различных дефектов будет способствовать ухудшению прочностных характеристик строительной конструкции [1].

В данной работе приводятся результаты определения напряженно-деформированного состояния свай, полученные на основе конечно-элементного решения линейных краевых задач в трехмерной постановке [2–5], экспериментальных исследований работы свай на трехточечный изгиб в лабораторных условиях, опытной забивки свай, армированных композитной арматурой на строительной площадке, а также оценки экономической эффективности замены металлической арматуры на СПА.

1. Объект исследований

В качестве объекта исследования была выбрана типовая бетонная забивная свая квадратного сплошного сечения. В исследованиях рассматривались два варианта армирования:

– тип I — стальной арматурой (типовая свая С40.20-3);



Рис. 1. Сваи железобетонные квадратного сечения. Изготовитель — акционерное общество «ТЖБИ-4» (фотография предоставлена автором)

Таблица 1. Параметры металлического арматурного каркаса

Поз.	Наименование	Масса ед., кг	Кол-во	Примечание
	Свая С40.20-3			
	Детали			
1	Стержень Ø10АIII L=3958	2,44	4	9,76 кг
2	Спираль Ø4 Вр1 L=14198	1,31	1	1,31 кг

– тип II — стеклопластиковой полимерной арматурой (СПА).

Бетонные сваи были отлиты на производстве АО «ТЖБИ-4» (г. Тверь) (рис. 1, 2). В табл. 1 приведены параметры металлической арматуры, использованной при изготовлении свай, класс бетона по прочности — В25.

Для армирования свай применялась стеклопластиковая арматура номинальным диаметром 10 мм, произведенная компанией ООО «Композит Групп Челябинск», которая является одним из крупнейших предприятий — изготовителей композитных строительных материалов в России.

Таблица 2. Физико-механические свойства материалов

Параметр	Материал		
	СПА	Металл	Бетон В25
Модуль упругости, E , МПа	55	210	30
Коэффициент Пуассона, ν	0,35	0,27	0,40
Плотность, ρ , кг/м ³	2000	7800	2500

В табл. 2 приведены физико-механические свойства материалов, используемых в расчетах.

Расчетные сопротивления бетона R_b (при сжатии) и R_{bt} (при растяжении) для предельных состояний первой группы при классе бетона по прочности на сжатие В25 приняты соответственно 14,5 и 1,05 МПа, при расчете по вто-

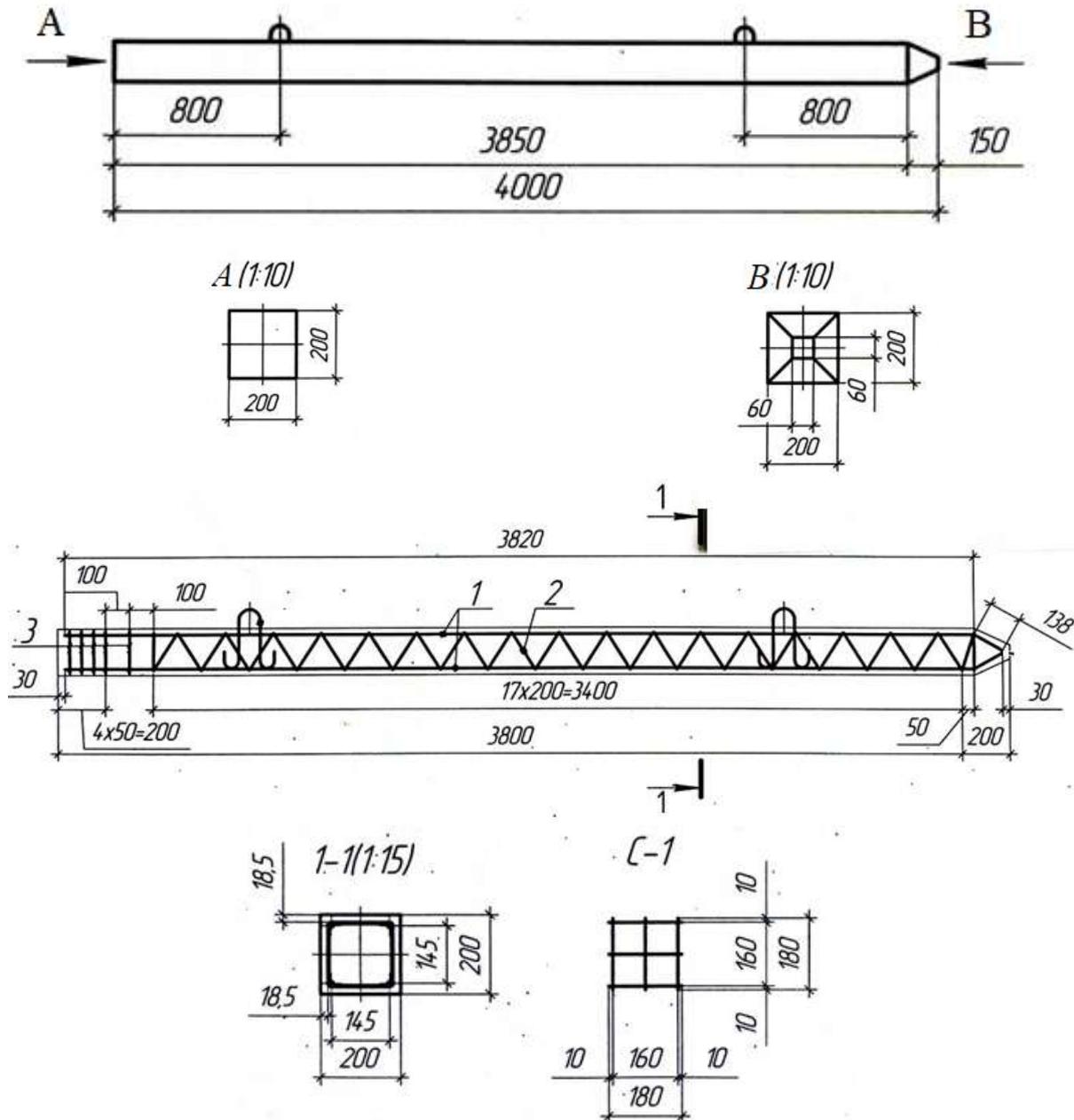


Рис. 2. Геометрические размеры и арматурный чертеж типовой бетонной сваи

рой группе предельных состояний — 18,5 и 1,55 МПа. При расчете по предельным состояниям первой группе принимается, что предельное состояние характеризуется достижением предельных усилий в бетоне растянутой зоны, определяемых в предположении упругой работы бетона.

2. Математическое моделирование и аналитические расчеты

Для выполнения расчетов использовался пакет конечно-элементного (КЭ) анализа ANSYS [6]. Задача решалась в трехмерной линейно упругой инфинитезимальной постановке с непосредственным учетом армирующих элементов. При моделировании использовались квадратичные изопараметрические КЭ SOLID186 для бетона, арматура моделировалась с помощью элементов REINF264. Всего КЭ модель содержит 4259 элементов и 14 534 узла (рис. 3, *а*, *б*). В качестве кинематических граничных условий задавался запрет вертикальных перемещений на узлах нижней грани сваи, расположенных на расстоянии 0,8 метра от краев призматического участка сваи (рис. 3, *в*).

2.1. Задача о транспортировке сваи: конечно-элементное моделирование

В качестве внешней нагрузки на сваю рассматривается гравитационное воздействие, то есть рассматривается изгиб двухопертой балки под действием только собственного веса. Потенциально возможные ударные нагрузки, несимметричные опирания при транспортировке сваи исключены.

Результаты конечно-элементного моделирования для сваи, армированной стеклопластиковой арматурой, представлены на рис. 4.

В табл. 3 приведены сравнительные результаты моделирования для всех рассмотренных случаев. Дополнительно рассмотрен случай бетонной сваи без армирования. Максимальные значения первого главного напряжения $\sigma_{1\max}$ в бетоне наблюдаются для забивной сваи без армирования (0,298 МПа), со СПА на 1,2 % меньше (0,294 МПа), еще на 3 % меньше у забивной сваи, армированной стальной арматурой (0,286 МПа).

С целью определения возможности сопротивления сваи дополнительным нагрузкам, возникающим при погрузо-разгрузочных работах, была рассмотрена задача о нагружении опертой сваи,

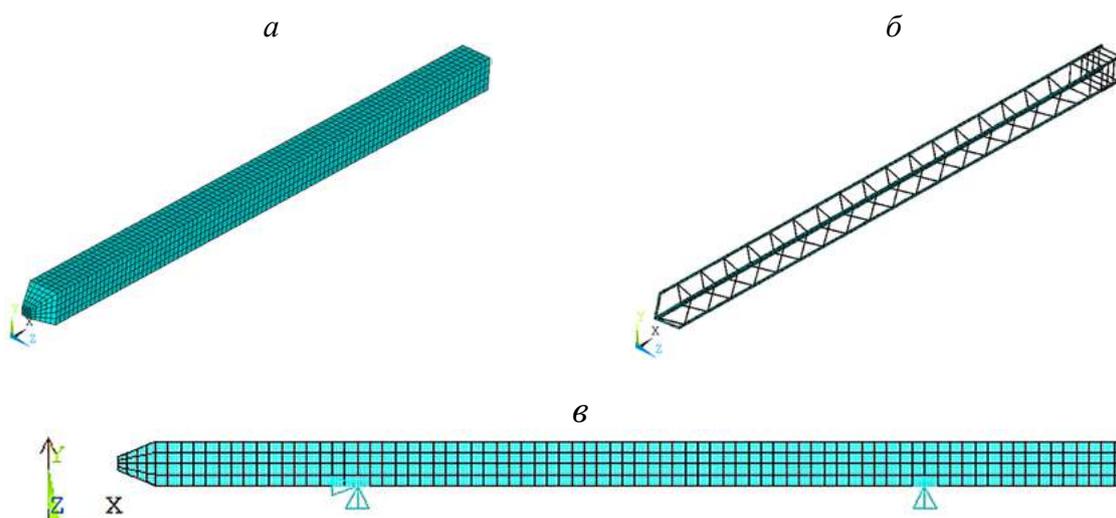


Рис. 3. Конечно-элементная модель армированной сваи:
а — бетонная свая; *б* — арматура; *в* — граничные условия

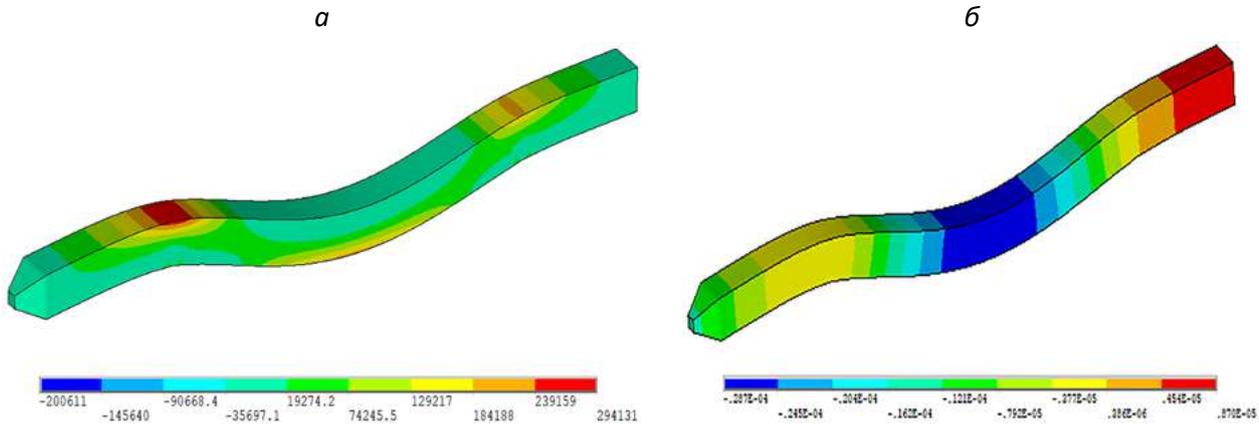


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние забивной сваи, армированной стеклопластиковой арматурой:
 а — поле первого главного значения тензора напряжений, Па;
 б — поле вертикальных перемещений, м

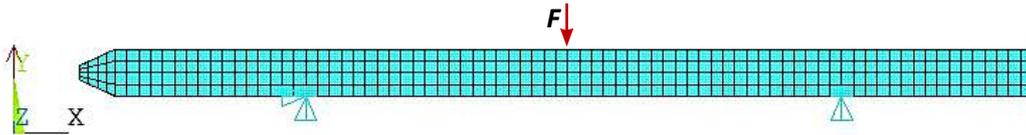


Рис. 5. Граничные условия при моделировании работы сваи при трехточечном изгибе

Таблица 3. Результаты конечно-элементного моделирования

Показатель	Материал армирования		
	без армирования	металл	СПА
Максимальное значение первого главного напряжения, σ_{1max} , МПа	0,298	0,286	0,294
Максимальное по модулю вертикальное перемещение (прогиб), v , мм	0,0291	0,0274	0,0286

армированной композитной арматурой, находящейся под действием собственного веса, дополнительной поперечной силой F , приложенной к середине сваи. Граничные условия представлены на рис. 5.

Установлено, что наибольшее значение приложенной силы, при котором максимальные показатели первого главного напряжения σ_{1max} не превышают расчетные сопротивления бетона при

растяжении $R_{bt} = 1,05$ МПа, составляет 278 кгс (2727 Н), что соответствует моменту образования первой трещины.

2.2. Учет динамических нагрузок, возникающих при транспортировке сваи

Учет динамического воздействия на сваю осуществлялся на основе введения коэффициента динамичности $\gamma = 1,6$, принятого согласно СП 295.1325800.2017. Максимальные показатели главного значения тензора напряжений с учетом динамических воздействий могут быть найдены путем умножения полученных в п. 2.1 напряжений на коэффициент динамичности и для забивной сваи без армирования составляют 0,477 МПа, со стеклопластиковой арматурой 0,470 МПа, армированной стальной арматурой 0,457 МПа. Во всех трех случаях напряжения не превышают расчетные сопротивления бетона при растяжении $R_{bt} = 1,05$ МПа, соответственно, рассмотренные варианты сваи проходят по первой группе предельных состояний.

2.3. Расчет свай, армированных композитной арматурой, по предельным состояниям второй группы

Согласно СП 295.1325800.2017 расчет бетонных конструкций, армированных полимерной композитной арматурой по предельным состояниям второй группы на образования трещин, производится из условия:

$$M > M_{crc}, \quad (1)$$

где M — изгибающий момент от внешней нагрузки относительно оси, нормальной к плоскости действия момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

M_{crc} — изгибающий момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента при образовании трещин, определяемый по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} \pm N e_x, \quad (2)$$

где $W_{pl} = 1,3 W_{red} = 1,3 \frac{I_{red}}{y_t}$ — упругий момент

сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения;

$I_{red} = I + I_a a$ — момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;

y_t — расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$a = E_a/E_b$ — коэффициент приведения арматуры к бетону;

I, I_a — моменты инерции сечений бетона и растянутой арматуры соответственно;

$e_x = W_{red}/A_{red}$ — расстояние от точки приложения продольной силы (расположенной в центре тяжести приведенного сечения элемента) до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется.

В выражении (3) знак «плюс» принимают при сжимающей продольной силе N , «минус» — при растягивающей силе.

Для рассматриваемой конструкции получается $M_{crc} = 3100$ Нм, что превосходит максимальный момент, полученный при конечно-элементном моделировании и с учетом коэффициента динамичности 1,6 составляющий 592 Нм. Соответственно, рассматриваемая конструкция удовлетворяет условию прочности по второй группе предельных состояний.

2.4. Задача о вдавливании сваи армированной композитной арматурой

2.4.1. Формулировка краевой задачи о вдавливании сваи

Рассматривалась задача о вдавливании сваи, армированной композитной арматурой, под действием силы, ориентированной под углом α к оси сваи (рис. 6). Определялась зависимость максимально допустимой нагрузки F , не приводящей к разрушению сваи от угла ее отклонения относительно оси сваи. На основании сваи задавалось закрепление по всем степеням свободы (жесткая заделка).

Equation Section 1

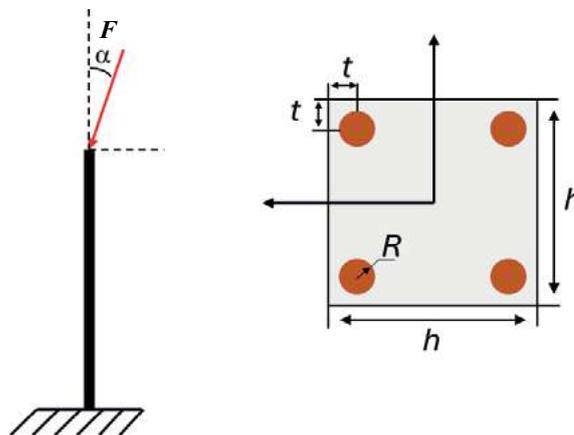


Рис. 6. Постановка задачи о вдавливании сваи

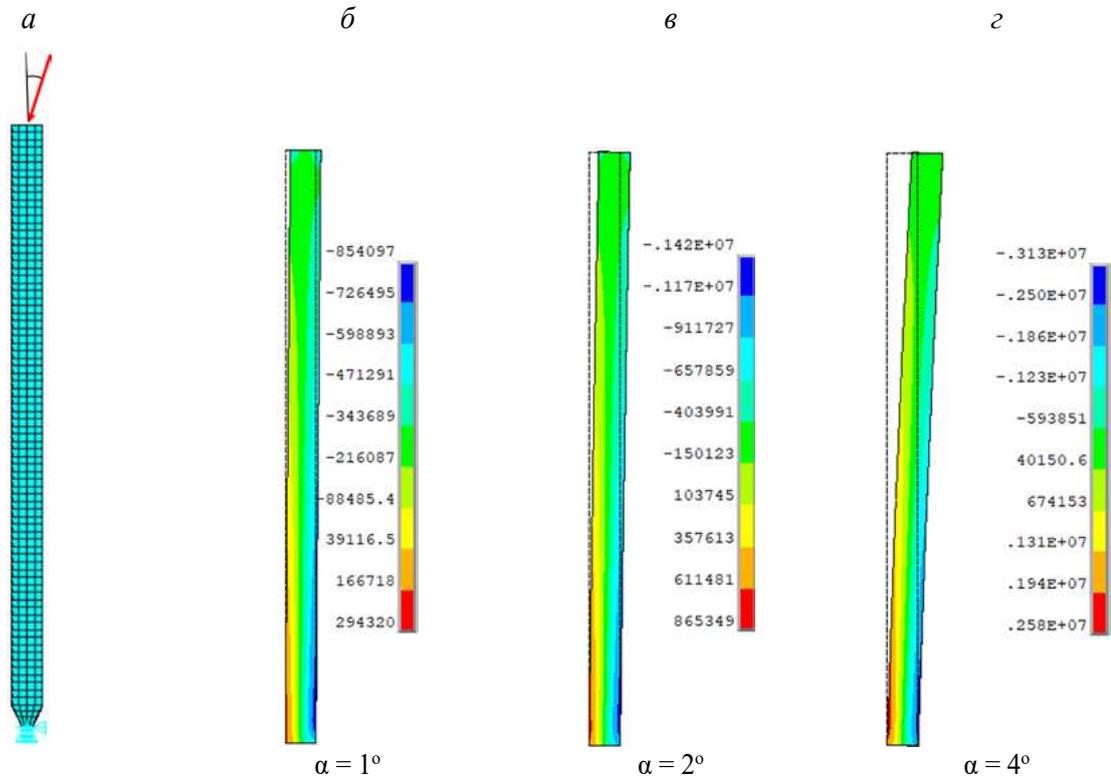


Рис. 7. Решение задачи о вдавлении сваи:

a — конечно-элементная постановка задачи; *б, в, з* — поля осевых напряжений для трех значений угла отклонения силы от оси сваи α .

Масштаб перемещений увеличен в 10 раз для наглядности

2.4.2. Результаты решения краевой задачи о вдавлении сваи

Задача решалась в двух постановках: аналитически на основе уравнений (3) — (7) и численно в конечно-элементном пакете ANSYS.

$$W_z = \frac{h^3}{6} + \frac{2\pi R^2 (h - 2t)^2}{h} \left(\frac{E_{арм}}{E_{бет}} - 1 \right). \quad (6)$$

Критическое значение силы может быть определено из соотношения:

$$\sigma = - \frac{F \sin \alpha (l_1 + l_2 + l_3 - x)}{I_z} \times y - \frac{F \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}}. \quad (3)$$

$$I_z = \frac{h^4}{12} + \pi R^2 (h - 2t)^2 \left(\frac{E_{арм}}{E_{бет}} - 1 \right). \quad (4)$$

$$\sigma_{\max, \min} = - \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} \pm \frac{Fl \sin \alpha}{W_z}. \quad (5)$$

$$F_{cr} = \min \left\{ R \left(- \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} + \frac{Fl \sin \alpha}{W_z} \right)^{-1}, R \left(- \frac{FE_{бет} \cos \alpha}{(h^2 - 4\pi R^2) E_{бет} + 4\pi R^2 E_{арм}} - \frac{Fl \sin \alpha}{W_z} \right)^{-1} \right\}, \quad (7)$$

где $R = \begin{cases} R_b, \sigma < 0 \\ R_{bt}, \sigma > 0 \end{cases}$.

Конечно-элементная постановка задачи представлена на рис. 7, а, поля осевых напряжений для трех значений угла отклонения при нагружении силой 10 кН от оси сваи представлены на рис. 7, б–г.

Установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации (рис. 8). Так, при отклонении оси приложения силы от вертикали в один градус значение критической силы падает в 12 раз по сравнению к случаю силы, приложенной вдоль оси сваи. Данный факт объясняется возникновением изгибающих нагрузок, которые, в свою очередь, приводят к возникновению области растяжения и ввиду разной сопротивляемости бетона к растяжению и сжатию приводят к резкому снижению допускаемых напряжений.

3. Экспериментальные исследования несущей способности свай

С целью верификации полученных результатов аналитических и конечно-элементных расчетов выполнены экспериментальные исследования несущей способности свай при трехточечном

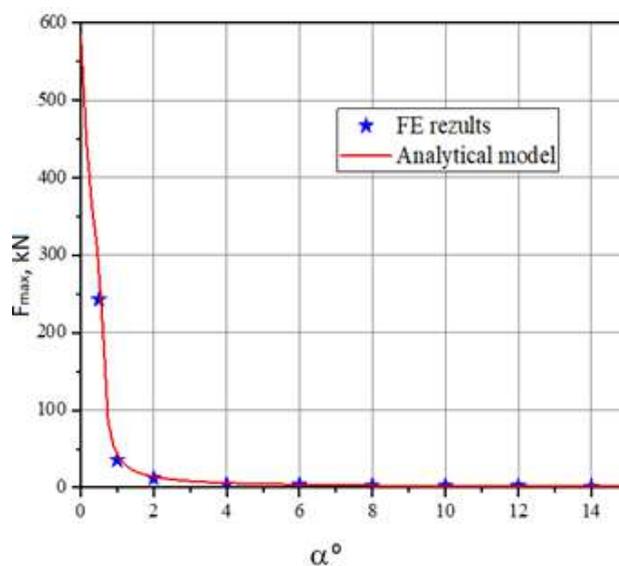


Рис. 8. Зависимость максимально допустимой силы от ее отклонения от оси сваи

изгибе. Были испытаны сваи с композитным и стальным армированием. На рис. 9 представлен испытательный стенд, а в табл. 4 приведены результаты испытаний.

Установлено, что главными отличиями работы свай с композитным армированием от свай с металлическим каркасом являются:



Рис. 9. Стенд для испытаний свай на трехточечный изгиб

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований на трехточечный изгиб свай

Степень нагружения	Нагрузка, F , кН			Прогиб, v , мм		
	Образец № 1. Композитная	Образец № 2. Композитная	Образец № 3. Стальная	Образец № 1. Композитная	Образец № 2. Композитная	Образец № 3. Стальная
1	3,80	3,52	3,80	0,83	0,88	0,45
2	7,60	7,20	7,20	1,95	2,09	0,97
3	10,82	9,89	11,47	3,70	3,87	1,99
4	—	—	15,23	—	—	3,11
5	—	—	19,25	—	—	4,61
6	—	—	22,50	—	—	6,77
7	—	—	25,20	—	—	8,12

Степень нагружения	Трещины		
	Образец № 1. Композитная	Образец № 2. Композитная	Образец № 3. Стальная
1	Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм	Появилась трещина в центральной части на всю высоту сечения. Максимальное раскрытие 0,1 мм	Мелкие трещины (5 шт.), равномерно распределенные между опорами. Длина трещин 1/3 от высоты сечения
2	Дальнейшее раскрытие центральной трещины до 0,20–0,25 мм. Новая трещина длиной 2/3 сечения, раскрытие до 0,15 мм	Раскрытие центральной трещины до 0,30 мм. Несколько новых трещин слева и справа от центрального сечения длиной 2/3 высоты сечения. Раскрытие до 0,10–0,15 мм	Рост трещин до 1/2 высоты сечения, раскрытие центральных трещин до 0,15 мм
3	Раскрытие 1-й и 2-й трещин до 0,5–0,7 мм. Падение нагрузки до 7,75 кН. Потеря несущей способности	Появление новых трещин. Раскрытие центральной трещины до 0,45–0,50 мм. Падение нагрузки до 8,8 кН. Потеря несущей способности	Центральная трещина выросла до 2/3 высоты сечения. Ширина раскрытия 0,15–0,20 мм
4	—	—	Незначительный прирост трещин по длине (15–20 мм). Максимальная ширина раскрытия 0,20–0,25 мм
5	—	—	Дальнейший рост трещин. Максимальное раскрытие 0,3–0,4 мм
6	—	—	Максимальное раскрытие 0,5–0,7 мм
7	—	—	Потеря несущей способности

1) пониженные прочностные характеристики свай в целом (по потере несущей способности в 2,4 раза);

2) появление трещин уже при начальной стадии нагружения в центральном сечении на всю высоту поперечного сечения, причинами которых являются бóльшая изгибная дефор-

мативность свай с СПА, а также применение в конструкции арматурного каркаса полимерных хомутов.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 10, а верификация полученных расчетными методами результатов с экспериментальными данными для свай, армированных

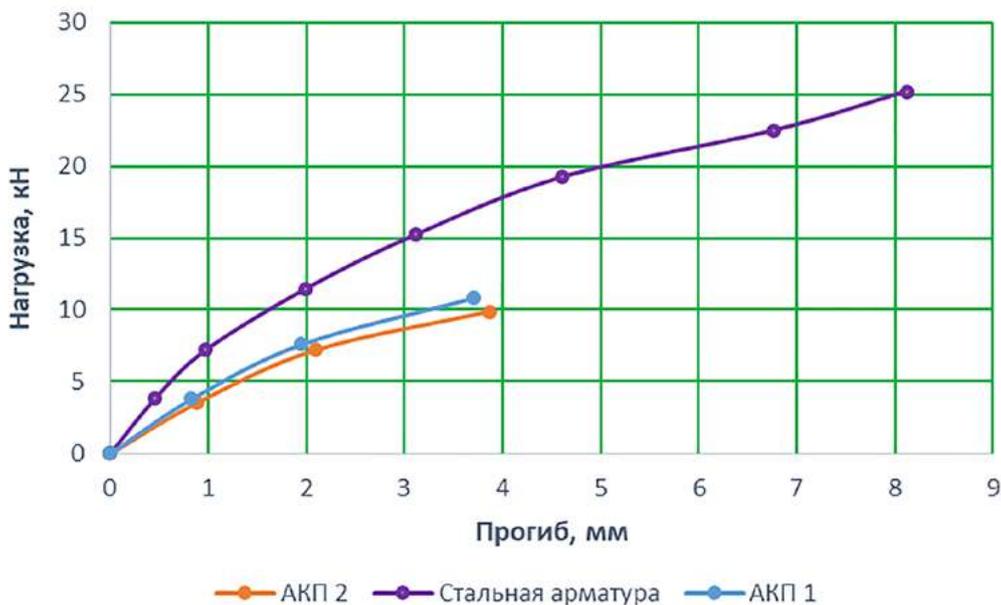


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований свай, армированных металлической арматурой и СПА, на трехточечный изгиб

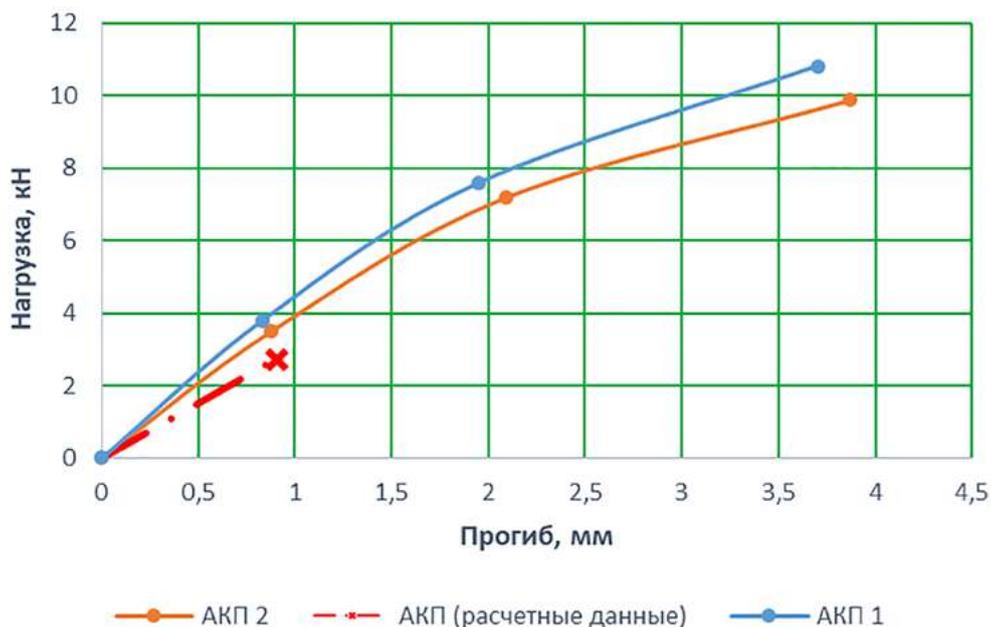


Рис. 11. Верификация результатов экспериментальных исследований свай, армированных СПА, на трехточечный изгиб с результатами численного моделирования

СПА, приведена на рис. 11. Выявлено, что значения нагрузок, при которых появляется первая трещина, при экспериментальных исследованиях (3,66 кН) в 1,34 раза выше значений, полученных

при численном моделировании (2,73 кН), что прежде всего связано с тем, что реальная прочность бетона свай на сжатие выше планового класса прочности В25.



Рис. 12. Опытная забивка свай, армированных СПА, на строительной площадке (фотографии предоставлены автором)

4. Результаты опытного применения свай, армированных СПА

С целью опытной апробации возможности применения СПА для армирования свай была выполнена опытная забивка свай на реальной строительной площадке (рис. 12).

В результате опытной забивки установлено, что сваи, армированные СПА, не отличаются от свай, армированных традиционной металлической арматурой, трещин при транспортировке свай, установке и забивки их в проектное положение не обнаружено.

5. Оценка экономической эффективности замены металлической арматуры на композитную при производстве забивных свай квадратного сплошного сечения

Выполнена экономическая оценка стоимости двух типов забивных свай квадратного сплошного сечения, армированных различными видами арматуры.

Установлено, что при использовании композитной арматуры стоимость свай уменьшается на 12 % по сравнению с традиционной металлической арматурой (расчет произведен в ценах

2024 года), при этом наибольшие затраты на каркас (до 50 %) приходится на композитные хомуты, стоимость которых может быть существенно снижена при их оптовой закупке.

Заключение

1. Выполнен анализ влияния типа используемой арматуры в конструкции забивных свай квадратного сплошного сечения на напряженно-деформированное состояние бетонной сваи при ее транспортировке и погрузо-разгрузочных работах. При проведении расчетов оценки прочности рассмотрено два варианта армирования: стальная арматура и стеклопластиковая арматура. Для всех рассматриваемых вариантов свай значения максимальных главных напряжений не превосходят 0,3 МПа, что дает более чем трехкратный запас прочности по сравнению с пределом прочности бетона марки В25. Даже при рассмотрении коэффициента динамичности, равного 1,6, выполняется условие обеспечения прочности армированной сваи. Таким образом, выбор вида армирующего материала (сталь или СПА) не оказывает значительного влияния на максимальные напряжения в бетоне. Отличие в максимальных главных напряжениях в бетоне для забивной сваи, армированной стеклопластиковой арматурой и стальной арматурой, не превышает 3 %. Валидация модели выполнена путем сравнения полученных результатов с результатами экспериментальных исследований при трехточечном изгибе сваи.

2. В задаче о вдавливании сваи, армированной СПА, установлена сильная зависимость значения максимально допустимой силы от ее ориентации. При разориентации в один градус значение критической силы падает в 12 раз по сравнению с случаем силы, приложенной вдоль оси сваи.

3. В результате опытной забивки установлено, что сваи, армированные СПА, не отличаются от свай, армированных традиционной металличе-

ской арматурой, трещин при транспортировке свай, установке и забивки их в проектное положение не обнаружено.

4. Определен экономический эффект от замены традиционной металлической арматурой на композитную арматуру, выражающийся в снижении стоимости конечного продукта (сваи) на 12 % и который может быть значительно увеличен за счет снижения стоимости композитных хомутов, применяемых при изготовлении арматурного каркаса.

Список источников

1. Дедков В. И. Исследование влияния технологических и монтажных факторов на долговечность забивных свай в агрессивных грунтовых средах / В. И. Дедков // Повышение долговечности строительных конструкций в агрессивных средах: тез. докл. науч.-техн. семинара. — 1987. — С. 56–57.

2. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 5(40). — С. 86–99.

3. Бенин А. В. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения / А. В. Бенин, А. С. Семенов, С. Г. Семенов и др. // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — № 1(45). — С. 23–40.

4. Renić T. Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars / T. Renić, T. Kišiček // Buildings. — 2021. — Vol. 11. — P. 424.

5. Sharabi M. N. Numerical modeling of reinforced-concrete bond / M. N. Sharabi // Nuclear Engineering and Design. — 1986. — Vol. 91. — Pp. 207–216.

6. ANSYS. Academic Research, Release 15.0.

Дата поступления: 31.01.2025

Решение о публикации: 27.02.2025

Контактная информация:

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», начальник научно-исследовательской части; benin@pgups.ru

БЕЛЯЕВ Олег Юрьевич — директор; Belyi25@ya.ru

БОГДАНОВА Екатерина Романовна — инженер отдела реализации научно-технических программ, ассистент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций»; univer006@mail.ru

КРИСТ Роберто — д-р техн. наук, профессор, кафедра «Гражданское строительство

и охрана окружающей среды»; rchrist@unisinob.br

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич — канд. техн. наук,

доцент кафедры «Производство строительных изделий и конструкций», руководитель службы качества

ТЖБИ-4; yuriy-k@yandex.ru

Experimental and Analytical Assessment of Use of Composite Rebars for Reinforcing Driven Piles with Solid Square Cross-Section

A. V. Benin¹, O. Yu. Beliaev², E. R. Bogdanova¹, R. Christ³, Yu. Yu. Kuryatnikov⁴

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Composite Group Chelyabinsk LLC, 36, building 1, 2-ya Paveletskaya Str., Chelyabinsk, 454047, Russian Federation

³Department of Civil and Environmental, Universidad de la Costa, Calle 58, 55-66, Barranquilla 080002, Colombia

⁴Tver State Technical University, 22 Nikitin Embankment, Tver, 170026, Russian Federation

For citation: Benin A. V., Beliaev O. Yu., Bogdanova E. R., Christ R., Kuryatnikov Yu. Yu. Experimental and Analytical Assessment of Use of Composite Rebars for Reinforcing Driven Piles of Solid Square Cross-Section // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 238–251. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-238-251

Summary

Purpose: To consider the possibility of using composite rebars in the construction of square-section driven piles. **Methods:** Analytical and experimental studies have been carried out on how the type of rebars used in concrete driven piles affect strength and rigidity in the process of unloading. **Results:** The article presents the results of calculations of the short-term strength reserve coefficients of concrete driven piles reinforced with fiberglass composite rebars during their transportation. A strong dependence of the maximum allowable force value on its orientation during pile indentation has been established. The results of experimental driving of piles reinforced with composite rebars are presented. **Practical significance:** It has been established that piles reinforced with composite rebars do not differ in their properties from those reinforced with traditional metal armature. The economic effect of replacing traditional metal reinforcement with composite rebars reflected in the cost reduction of the final product (piles) has been determined.

Keywords: Concrete driven piles, composite rebars, safety margin, mathematical modelling, finite element modelling, experimental research, experimental pile driving, economic effect.

References

1. Dedkov V. I. Issledovanie vliyaniya tehnologicheskikh i montajnih faktorov na dolgovechnost zabivnih svai v agressivnykh gruntovykh sredakh [Investigation of the influence of technological and installation factors on the durability of driven piles in aggressive ground environments]. *Povyshenie dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksiy v agressivnykh sredakh: tez. dokl. nauch.-tekhn. seminar* [Increasing the durability of building structures in aggressive environments: report summary of the scientific and technical seminar]. 1987, pp. 56–57 p. (In Russian)

2. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. et al. Matematicheskoe modelirovanie processa razrusheniya scepneniya armaturi s betonom. Chast' 1. Modeli s uchedom nesploshnosti soedineniya [Mathematical modeling of the process of fracture of reinforcement adhesion to concrete. Part 1. Models taking into account the discontinuity of the connection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal]. 2013, Iss. 5(40), pp. 86–99. (In Russian)

3. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. et al. Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast' 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soedineniya [Mathematical modeling of the process of fracture of reinforcement adhesion to concrete. Part 2. Models taking into account the discontinuity of the connection]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil Engineering Journal]. 2014, Iss. 1(45), pp. 23–40. (In Russian)

4. Renić T., Kišiček T. Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars. *Buildings*, 2021, vol. 11, pp. 424.

5. Sharabi M. N. Numerical modeling of reinforced-concrete bond. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, vol. 91, pp. 207–216.

6. ANSYS. Academic Research, Release 15.0.

Received: January 31, 2025

Accepted: February 27, 2025

Author's information:

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Mechanics and Strength of Materials and Structures”, Head of the Research Department; benin@pgups.ru

Oleg Yu. BELIAEV — Director; Belyi25@ya.ru

Ekaterina R. BOGDANOVA — Engineer, Department for the implementation of scientific and technical programmes, Assistant of the Department “Mechanics and Strength of Materials and Structures”; univer006@mail.ru

Roberto CHRIST — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Civil and Environmental; rchrist@unisinis.br

Yuriy Yu. KURYATNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Department “Production of Building Products and Structures”, Head of the Quality Service TzhBI- 4; yuriy-k@yandex.ru

УДК 69.05

Устойчивое строительство: международные практики и рекомендации для интеграции в казахстанские проекты

Т. Аввад¹, А. А. Петренко²

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

²Торайгыров Университет, Республика Казахстан, 140008, Павлодар, ул. Ломова, 64

Для цитирования: Аввад Т., Петренко А. А. Устойчивое строительство: международные практики и рекомендации для интеграции в казахстанские проекты // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 252–262. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-252-262

Аннотация

Цель: Исследовать международные практики устойчивого строительства и разработать рекомендации по их интеграции в строительные проекты Казахстана. В условиях усиления экологических вызовов строительная отрасль играет ключевую роль в достижении целей устойчивого развития (ЦУР). Это требует не только адаптации передовых методов и подходов, успешно применяемых в других странах, к местным условиям, но и учета специфических особенностей климатических, экономических и социальных факторов региона. **Методы:** Исследование основано на анализе научной литературы, международных отчетов и стандартов, посвященных устойчивому строительству. В ходе работы применялись как качественные, так и количественные методы, включая сравнительный анализ международных практик и их последующую оценку на соответствие ЦУР. Особое внимание уделено изучению зеленых рейтинговых систем, инструментов оценки устойчивости и экологически чистых технологий, которые демонстрируют высокий потенциал для применения в Казахстане. Анализ также включал рассмотрение опыта зарубежных ученых в реализации подобных проектов. **Результаты:** Проведенное исследование позволило выделить ключевые факторы, способствующие успешной интеграции международных практик. К ним относятся снижение потребления природных ресурсов, значительное повышение энергоэффективности, а также улучшение социальных аспектов эксплуатации зданий. В дополнение разработаны рекомендации по совершенствованию правовой и нормативной базы, что создаст условия для ускоренного внедрения устойчивого строительства в Казахстане. **Практическая значимость:** Предложенные рекомендации могут стать основой для разработки национальных стандартов устойчивого строительства, что поможет улучшить качество проектирования и эксплуатации зданий. Это снизит воздействие на окружающую среду, повысит экономическую эффективность строительных проектов и внесет вклад в достижение ЦУР к 2030 году.

Ключевые слова: Устойчивое строительство, цели устойчивого развития, энергоэффективность, зеленые технологии, ресурсоэффективность, Казахстан.

Введение

В 2015 году 193 государства — члена Организации Объединенных Наций утвердили программу «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года», включающую 17 целей и 169 задач

[1]. На рис. 1 представлены все 17 ЦУР, которые учитываются при анализе международных практик устойчивого строительства.

Решение задач устойчивого развития в строительном секторе особенно важно в связи с тем, что эта отрасль перерабатывает огромные объ-



Рис. 1. 17 целей устойчивого развития по классификации ООН

емы материальных и энергетических ресурсов. На практике устойчивое развитие в строительной сфере означает необходимость дальнейшего экономического развития при ограничении потребления вещества (энергии и массы) и строительства экологически чистых зданий.

Устойчивое развитие рассматривается в трех аспектах: экологическом, социальном и экономическом. В строительстве эти аспекты можно охарактеризовать следующим образом:

1. Экономический аспект включает в себя снижение эксплуатационных расходов здания за счет применения современных решений как в области проектирования, так и применяемых материалов, эксплуатации; снижение затрат на снос.

2. Экологический аспект включает в себя сокращение потребления энергии, воды, сырья, выбросов парниковых газов и производства отходов.

3. Социальный аспект включает в себя повышение качества жизни, заинтересованности в здоровье, комфорте и безопасности пользователей или жильцов, например путем обеспечения адекватного обмена и качества воздуха в помещении.

Материалы и методы

В основе исследования лежит обзор существующей литературы, посвященной зеленым рейтингам, инструментам и стандартам оценки устойчивости, исследующим вклад строительного сектора в достижение ЦУР.

Для анализа потенциальной роли строительной отрасли в реализации повестки дня в области устойчивого развития (далее — УР) на период до 2030 года была использована методология, включающая определение ключевых аспектов устойчивости, сравнительный анализ международных примеров.

Данные для анализа собирались из официальных отчетов международных организаций, научных статей и практических руководств по устойчивому строительству. Использовались как качественные, так и количественные методы анализа, включая анализ текстов и статистическую оценку эффективности различных подходов.

Результаты исследования

В изученной литературе существующие зеленые рейтинги, инструменты и стандарты оценки устойчивости используются в качестве основы для исследования того, как строительство и зда-

ния могут внести вклад в повестку дня в области УР на период до 2030 года.

Однако меньше внимания уделялось изучению широкого пересечения между строительным сектором с одной стороны и ЦУР и их задачами с другой.

Международные стандарты, такие как LEED, BREEAM и CASBEE, оказывают существенное влияние на проектирование и эксплуатацию зданий по всему миру [2–4].

В Казахстане уже начата работа по адаптации этих стандартов для местных условий. Существует необходимость в разработке национальных инструментов оценки устойчивости зданий, что позволит учитывать специфические климатические и социальные условия. Это также уменьшит затраты на сертификацию, которые в настоящее время могут достигать значительных сумм для крупных коммерческих зданий [5–7].

В рассмотренном исследовании *On the Role of Construction in Achieving the SDGs* используется многоэтапная методология для анализа потенциальной роли строительства и недвижимости в реализации ЦУР [8].

В документе определены задачи ЦУР, которые зависят (прямо или косвенно) от деятельности в сфере строительства и недвижимости, и показано, что 17 % задач ЦУР напрямую зависят, а 27 % задач косвенно зависят от деятельности этих секторов.

Выявленные задачи анализируются, и оказывается, что они связаны со всеми 17 целями, внося наибольший вклад в достижение ЦУР 11, 6 и 7. Результаты анализа нанесены на карту и проиллюстрированы, чтобы предоставить ученым, практикам и правительствам ценную информацию.

Это исследование также раскрывает синергетические возможности и необходимые партнерства для использования потенциальной роли строительства и недвижимости в реализации повестки дня ООН.

В результате проведенного контент-анализа исследователи пришли к выводу, что 74 из 169 задач повестки дня (44 %) зависят от деятельности в сфере строительства и недвижимости, из них 29 задач (17 %) зависят напрямую и 45 задач (27 %) зависят косвенно.

Если посмотреть на полный список выявленных целей, распределение задач по целям, становится ясно, что строительство и деятельность в сфере недвижимости играют роль, прямо или косвенно, во всех 17 ЦУР.

Было установлено, что ЦУР 11 в наибольшей степени зависит от деятельности в области строительства и недвижимости: из 10 перечисленных целей 8 находились в прямой зависимости и 1 — в косвенной зависимости.

Кроме того, более 30 % задач ЦУР 6, 7 и 15 напрямую зависели от деятельности в сфере строительства и недвижимости. Наконец, все задачи ЦУР 7 зависели от деятельности в сфере строительства и недвижимости: 2 цели напрямую и 3 косвенно.

В этой статье конкретно указано, как секторы строительства, строительства и недвижимости взаимодействуют с ЦУР — ключевым компонентом дорожной карты сектора ЦУР, предложенной Всемирным деловым советом по устойчивому развитию (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) [9, 10].

Эта статья предоставляет ученым, а также государственным и частным организациям всесторонний обзор потенциальной роли строительства и недвижимости в достижении конкретных целей как прямо, так и косвенно.

Авторы также указывают, что исследования, направленные на устойчивость искусственной среды, должны разработать и протестировать адекватные механизмы, которые облегчат интеграцию ЦУР и их задач в практику строительства и недвижимости. Необходимы дополнительные исследования для изучения и анализа процес-

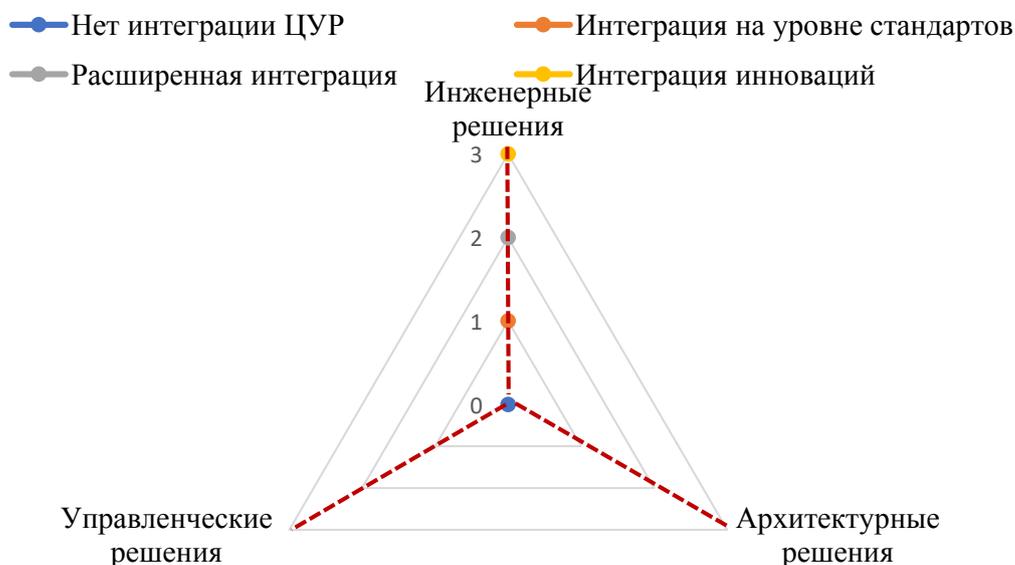


Рис. 2. Шкала оценки уровней интеграции ЦУР

сов и методов, которые можно использовать для достижения такой интеграции.

Важным аспектом устойчивого строительства является использование современных технологий реконструкции в условиях плотной городской застройки, а также новые технологии подготовки грунтов и строительства фундаментов [11, 12].

В исследовании *Integrating the Sustainable Development Goals in Building Projects* представлены два инструмента, разработанные для оценки и визуализации того, как цели устойчивого развития (ЦУР) интегрируются в строительные проекты. Эти инструменты позволяют определить, насколько проект соответствует принципам устойчивого развития, а также помогают анализировать проектные решения и их связь с конкретными целями [13].

Для демонстрации их практической ценности было проанализировано энергоэффективное здание в Квебеке. Исследование сосредоточилось на восьми из семнадцати ЦУР, выявляя конкретные проектные решения, которые способствовали их достижению. Например, в здании использованы энергосберегающие технологии, устойчивые

строительные материалы и системы, снижающие углеродный след. Также был изучен подход проектной команды, которая уделяла особое внимание долгосрочному влиянию здания на окружающую среду и общество.

Результаты показали, что проект превзошел стандартные строительные практики за счет внедрения инновационных решений, таких как использование возобновляемых источников энергии и адаптация к изменяющимся экологическим условиям. Эти подходы могут стать ориентиром для частных и государственных организаций, заинтересованных в устойчивом строительстве. Кроме того, работа подчеркивает важность связи между глобальными целями и локальными проектами, предлагая инструменты, которые облегчают их интеграцию.

Методология исследования включает три основных направления анализа. На основе существующих научных данных [14] была разработана карта, которая классифицирует интеграцию ЦУР на четырех уровнях для каждого из направлений. Эта структура помогает систематизировать и оценивать прогресс в достижении целей устойчивого развития в строительных проектах (рис. 2).

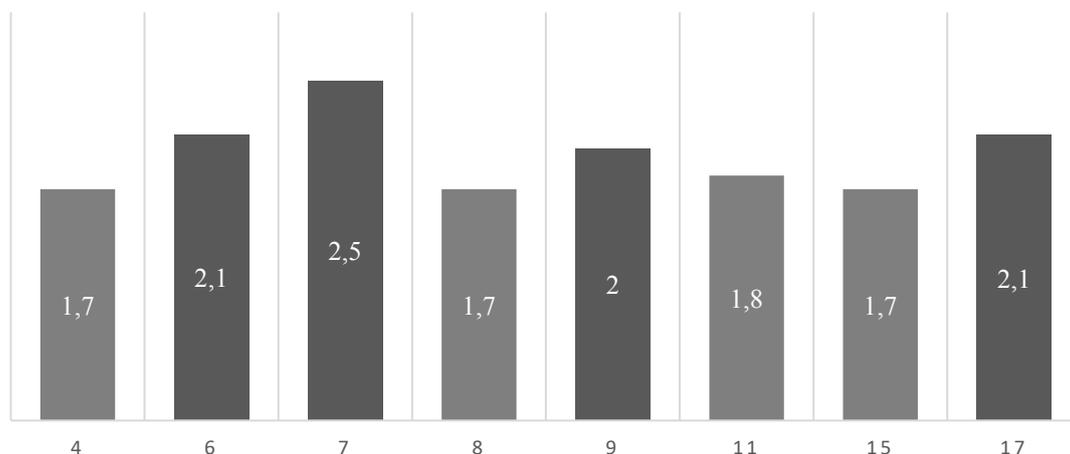


Рис. 3. Общая оценка уровня интеграции для 8 выбранных ЦУР (темно-серым цветом выделены цели, которые имеют уровень интеграции 2 или выше)

Уровень 3: инновационные подходы для достижения ЦУР, создающие новые стандарты в проектировании.

Уровень 2: совершенствование и расширение существующих стандартов и инструментов.

Уровень 1: использование готовых стандартов и примеров для реализации целей.

Уровень 0: отсутствие интеграции или частичная реализация ЦУР в отдельных аспектах проекта.

Сводная общая оценка уровня интеграции по каждой из 8 целей представлена на рис. 3.

Средний балл интеграции по всем восьми ЦУР составил 1,9, что свидетельствует о том, что проект выходит за рамки стандартных подходов и критериев.

Наиболее высокие оценки (2 и выше) были присвоены ЦУР 6 (чистая вода), ЦУР 7 (энергетика), ЦУР 9 (индустрия, инновации и инфраструктура) и ЦУР 17 (партнерства). Из них ЦУР 7 была признана наиболее интегрированной в проекте.

В рамках исследования респонденты были разделены на три группы:

1. Проектировщики (Designers) — исследователи и практикующие специалисты в области проектирования и архитектуры.

2. Инженеры (Engineers) — исследователи и практикующие специалисты в области инженерии и организации строительного производства.

3. Менеджеры и координаторы (Managers and Facilitators) — участники процесса, не занимающиеся проектированием и строительным производством, но ответственные за административные и организационные аспекты.

Сравнение оценок трех групп участников исследования выявило значительные различия.

Проектировщики оказались наиболее критичны: они оценивали интеграцию каждой из восьми ЦУР как самую низкую, с общим средним баллом 1,5. Исключением стала ЦУР 7, которая получила от этой группы максимальную оценку 2.

Группа менеджеров, напротив, демонстрировала наиболее оптимистичное восприятие, присваивая средний балл 2,4 по всем ЦУР. Они также значительно выше оценили интеграцию ЦУР 11 (устойчивые города) по сравнению с другими группами.

Проектировщики и инженеры заняли промежуточную позицию, фокусируясь на четырех ЦУР, признанных наиболее интегрированными в проекте.

Таким образом, различия в оценках подчеркивают субъективный характер восприятия интеграции ЦУР в проект. Однако общий уровень интеграции указывает на превышение стандартных подходов, особенно в области энергетики (ЦУР 7).

Анализ распределения результатов по трем осям карты показал, что основная часть интеграции для четырех ЦУР (отмеченных серым на рис. 3) была достигнута через инженерную ось. Средние оценки инженерной интеграции составили: 2,2 для ЦУР 6, 2,6 для ЦУР 7, 2,3 для ЦУР 9. Исключением стала ЦУР 17, где наибольшая интеграция наблюдалась через архитектурную ось (2,1). Наименьшая интеграция, по мнению авторов, была связана с эксплуатационным этапом.

Сравнение оценок трех групп участников выявило различия в восприятии. Проектировщики отметили инженерные и эксплуатационные вмешательства как основные способы интеграции. Менеджеры оценили инженерную интеграцию выше других аспектов. Инженеры, в свою очередь, отметили сбалансированную интеграцию по всем трем осям.

Исследование подчеркивает возможности применения повестки до 2030 года в строительстве, демонстрируя на примере проекта строительства нового центра интерпретации для Union Québécoise de Réhabilitation des Oiseaux de Proie (UQROP, Квебекский союз по реабилитации хищных птиц, Канада) интеграцию как минимум восьми ЦУР и углубленную проработку четырех из них на ранних этапах проекта [15].

Предложенные качественные инструменты и карты служат дополнением к формальным методам количественной оценки, применяемым в строительной и туристической отраслях (таким как кредитные инструменты, энергетические кодексы и стандарты зеленого строительства), а не их заменой.

Заключение

В ходе анализа различных источников мирового опыта были выявлены ключевые аспекты концепции устойчивого развития в контексте строительства, включая принципы действий и методы ограничения негативного воздействия на окружающую среду.

Интеграция целей устойчивого развития в строительные проекты остается недостаточно изученной, несмотря на ее значительный потенциал.

Аналитические инструменты картографирования и практические примеры служат основой для оценки текущего уровня интеграции ЦУР в строительные проекты и разработки эффективных стратегий для его повышения.

Однако, несмотря на значительные успехи в интеграции устойчивых методов в строительные проекты, существуют заметные пробелы и вызовы, которые ограничивают потенциал отрасли:

1. Ограниченное применение стандартов

Анализ показал, что интеграция ЦУР в строительные проекты часто ограничивается существующими стандартами и нормативами, без значительного инновационного подхода. Большинство строительных проектов опираются на уже установленные критерии и редко стремятся выйти за их рамки, что сдерживает развитие более амбициозных и комплексных решений.

2. Неравномерная интеграция по различным направлениям

Оценка интеграции по трем основным осям (инженерная, архитектурная и эксплуатационная) показала, что большинство усилий сосредоточено на инженерных вмешательствах. Архитектурная интеграция и эксплуатационные аспекты менее развиты, что указывает на недостаточную проработку вопроса на уровне проектирования и последующего обслуживания зданий. Это может ограничивать долгосрочную эффективность и устойчивость построек.

3. Разница в восприятии интеграции среди специалистов

Различия в оценках интеграции между проектировщиками, инженерами и менеджерами указывают на существующие противоречия в понимании и восприятии устойчивости. Проектировщики и инженеры оценивают уровень интеграции более критично, чем другие участники, что подчеркивает необходимость улучшения междисциплинарного взаимодействия и согласования подходов к устойчивому проектированию.

4. Недостаток системного подхода и инноваций

Высший уровень интеграции ЦУР (инновационная интеграция) достигается крайне редко. Строительные проекты преимущественно фокусируются на выполнении минимальных требований, что ограничивает внедрение новых технологий и инновационных решений. Это препятствует полной реализации потенциала устойчивого строительства и его роли в достижении ЦУР.

5. Барьеры и вызовы в интеграции ЦУР

Ключевыми барьерами являются высокая стоимость устойчивых материалов и технологий, ограниченные знания и навыки у специалистов, а также недостаток нормативно-правовой поддержки и стимулов со стороны государства. Без преодоления этих вызовов трудно ожидать значительного прогресса в более глубокой интеграции целей устойчивого развития.

Для достижения более глубокой и эффективной интеграции ЦУР в строительные проекты в Казахстане необходимо предпринять следующие шаги:

1. Усиление нормативно-правовой базы с учетом национальных особенностей. В Казахстане отсутствует единая система сертификации устойчивого строительства, аналогичная LEED или BREEAM, что затрудняет стандартизацию подходов. Разработка национальной системы сертификации, адаптированной к климатическим, экономическим и нормативным условиям страны, позволит сформировать четкие крите-

рии для устойчивого проектирования и строительства. Включение обязательных требований к экологическим характеристикам зданий в Строительные нормы Республики Казахстан (СН РК) и Свод правил Республики Казахстан (СП РК) и внедрение системы государственных стимулов, таких как субсидии и налоговые льготы для сертифицированных зданий, обеспечат более активное внедрение передовых решений в строительный сектор.

2. Инвестирование в образование и повышение квалификации в сфере устойчивого строительства. Одним из ключевых барьеров внедрения ЦУР в строительную отрасль Казахстана является нехватка специалистов, обладающих компетенциями в области устойчивого проектирования. Включение курсов по зеленым технологиям и энергоэффективному проектированию в образовательные программы архитектурных и инженерных вузов, проведение сертификационных программ и специализированных семинаров, а также разработка государственной системы грантов для повышения квалификации позволят устранить этот пробел и сформировать необходимый кадровый потенциал.

3. Междисциплинарное сотрудничество для внедрения комплексных решений. Архитекторы, инженеры, застройщики и государственные структуры в Казахстане зачастую работают разрозненно, что приводит к недостаточной интеграции экологических стандартов. Создание экспертных рабочих групп при профильных министерствах, внедрение обязательной комплексной оценки проектов с учетом устойчивости и развитие партнерств между государством, бизнесом и университетами позволят повысить качество внедрения ЦУР в строительные проекты. Разработка механизмов совместной работы специалистов различных направлений обеспечит более целостный подход к проектированию и эксплуатации устойчивых зданий.

4. Разработка и тестирование новых инструментов оценки устойчивости зданий. Строительные проекты в Казахстане оцениваются преимущественно по традиционным критериям, таким как себестоимость и базовая энергоэффективность, что не позволяет комплексно учитывать экологические и социальные факторы. Разработка национальной методики оценки, включающей такие параметры, как углеродный след, водопотребление и ресурсосбережение, внедрение цифровых систем мониторинга устойчивости зданий и тестирование пилотных проектов с последующей адаптацией их результатов, позволят сформировать более объективные механизмы оценки и стимулировать развитие устойчивых строительных практик.

5. Поощрение инноваций и исследований в области устойчивого строительства. Недостаточное количество прикладных исследований, посвященных адаптации международных стандартов к местным условиям, замедляет внедрение новых технологий в Казахстане. Государственная поддержка исследований, создание специализированных центров компетенций по зеленым технологиям при ведущих технических университетах и предоставление инновационных грантов девелоперам, использующим передовые решения, позволят устранить этот пробел. Дополнительные меры, направленные на тестирование и внедрение новых материалов, технологий пассивного охлаждения, возобновляемых источников энергии и интеллектуальных систем управления зданиями, обеспечат ускоренную интеграцию устойчивых практик.

Таким образом, настоящее исследование вносит вклад в развитие национального подхода к устойчивому строительству, который адаптирован к климатическим, экономическим и социальным условиям Казахстана. Предложенные меры могут послужить основой для дальнейших науч-

ных и прикладных исследований, направленных на разработку локальных стандартов устойчивости, оценку экономической эффективности зеленых технологий и их влияние на углеродный след зданий.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на разработке и тестировании локальных методов оценки устойчивости в строительных проектах Казахстана, а также на оценке экономической эффективности внедрения зеленых технологий в условиях страны. Важно будет изучить механизмы финансирования устойчивого строительства, включая создание гибкой системы поддержки для внедрения инновационных технологий и материалов. Исследования могут также затронуть вопросы интеграции цифровых решений, таких как использование интеллектуальных систем мониторинга для повышения энергоэффективности и снижения углеродного следа зданий. Эти направления будут способствовать более глубокой адаптации международных стандартов к казахстанским условиям и ускоренному внедрению практик устойчивого строительства в отрасль.

Список источников

1. Организация Объединенных Наций. Повестка дня в области устойчивого развития // Организация Объединенных Наций. — URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (дата обращения: 01.11.2024).
2. U.S. Green Building Council. LEED v4 for Building Design and Construction // U.S. Green Building Council. — 2023. — URL: <https://www.usgbc.org/leed> (дата обращения: 08.02.2025).
3. Building Research Establishment. BREEAM Technical Standards // Building Research Establishment. — 2023. — URL: <https://www.breeam.com/> (дата обращения: 10.02.2025).
4. Japan Sustainable Building Consortium. CASBEE Manual // Institute for Building Environment and Energy

Conservation. — 2023. — URL: <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/> (дата обращения: 10.02.2025).

5. Uyzbayeva A. Sustainable Built Environment in Kazakhstan: The Way towards Better IAQ / A. Uyzbayeva // *Proceedings 2018*. — Vol. 2. — Iss. 22. — Pp. 1384. — DOI: 10.3390/proceedings2221384.

6. Akhanova G. A Framework of Building Sustainability Assessment System for the Commercial Buildings in Kazakhstan / G. Akhanova, A. Nadeem, J. R. Kim et al. // *Sustainability*. — 2019. — Vol. 11. — Iss. 17. — P. 4754. — DOI: 10.3390/su11174754.

7. Assylbekov D. Factors Influencing Green Building Development in Kazakhstan / D. Assylbekov, A. Nadeem, M. Hossain et al. // *Buildings*. — 2021. — Vol. 11. — Iss. 12. — P. 634. — DOI: 10.3390/buildings11120634.

8. Goubran Sh. On the Role of Construction in Achieving the SDGs / Sh. Goubran // *Journal of Sustainability Research*. — 2019;1:e190020. — DOI: 10.20900/jsr20190020.

9. World Business Council for Sustainable Development. SDG Sector Roadmaps: Guidelines for the Development of Sector Roadmaps to Achieve the SDGs // WBCSD. — 2018. — URL: https://docs.wbcsd.org/2018/04/SDG_roadmap%20Guidelines.pdf (дата обращения: 12.02.2025).

10. Czajkowska A. The role of sustainable construction in sustainable development / A. Czajkowska // *MATEC Web of Conferences* 174(3):01027. — January, 2018. — DOI: 10.1051/mateconf/201817401027.

11. Awwad T. Sustainable Reconstruction in Conditions of Dense Urban Development / T. Awwad, V. Gruzin, V. Kim // *Current Geotechnical Engineering Aspects of Civil Infrastructures. GeoChina 2018. Sustainable Civil Infrastructures*. — Springer, Cham. — Pp. 13–23. — DOI: 10.1007/978-3-319-95750-0_2.

12. Awwad T. Upgrading of the Technologies of Soil Preparation and Construction of Foundations for Structures of Oil and Gas Industry / T. Awwad, A. Gruzin, V. Gruzin // *Advanced Research on Shallow Foundations. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures*. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 64–72. — DOI: 10.1007/978-3-030-01923-5_6

13. Sh. Goubran Integrating the Sustainable Development Goals in Building Projects / Sh. Goubran, C. Cucuzzella // *J Sustain Res*. 2019;1:e190010. — DOI: 10.20900/jsr20190010.

14. Kanters J. The design process known as IDP: A discussion / J. Kanters, M. Horvat // *Energy Procedia*. — 2022. — Vol. 30. — Pp. 1153–1162.

15. Goubran S. Sustainable Development Goals to support the design of an energy positive interpretation center for UQROP in Quebec, Canada: Conference Paper / S. Goubran, C. Cucuzzella, B. Lee // *50th Annual Conference of the Environmental Design Research Association (EDRA 50)*, Brooklyn, NY. — May 2019. — URL: https://www.researchgate.net/publication/334098292_Sustainable_Development_Goals_to_support_the_design_of_an_energy_positive_interpretation_center_for_UQROP_in_Quebec_Canada (дата обращения: 12.02.2025).

Дата поступления: 05.11.2024

Решение о публикации: 26.02.2025

Контактная информация:

АВВАД Талал — доктор PhD, профессор;
dr.awwad@ymail.com

ПЕТРЕНКО Александр Аркадьевич — магистрант;
petrenkoalex2000@mail.ru

Sustainable Construction: International Practices and Recommendations for Integration into Kazakhstan Projects

T. Awwad¹, A. A. Petrenko²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Toraighyrov University, 64, Lomov Str., Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan

For citation: Awwad T., Petrenko A. A. Sustainable Construction: International Practices and Recommendations for Integration into Kazakhstan Projects // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 252–262. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-252-262

Summary

Purpose: To study international practices in sustainable construction and to develop recommendations for their integration into construction projects in Kazakhstan. Amid growing environmental challenges, the construction sector plays a pivotal role in achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). This requires not only adapting advanced methods and approaches successfully applied in other countries to local conditions but also considering the specific climatic, economic, and social factors of the region. **Methods:** The research is based on the analysis of scientific literature, international reports, and standards on sustainable construction. Both qualitative and quantitative methods were employed including a comparative analysis of international practices and their subsequent evaluation in terms of SDG compliance. Special attention was paid to green rating systems, sustainability assessment tools, and environmentally friendly technologies, which demonstrate significant potential for implementation in Kazakhstan. The analysis also included examples of successful projects in the countries with similar climatic conditions. **Results:** The study identified key factors contributing to the successful integration of international practices. These include reducing the consumption of natural resources, significantly improving energy efficiency, as well as enhancing the social aspects of maintenance of buildings. Additionally, recommendations were developed to improve the legal and regulatory framework creating conditions for the accelerated adoption of sustainable construction in Kazakhstan. **Practical significance:** The proposed recommendations can serve as a basis for developing national standards for sustainable construction, which will help improve the quality of building design and maintenance. This will reduce environmental impact, enhance the economic efficiency of construction projects, and contribute to achieving the SDGs by 2030.

Keywords: Sustainable construction, sustainable development goals, energy efficiency, green technologies, resource efficiency, Kazakhstan.

References

1. Organizatsiya Ob'edinennykh Natsiy. Povestka dnya v oblasti ustoychivogo razvitiya [United Nations. Sustainable Development Agenda]. *Organizatsiya Ob'edinennykh Natsiy* [United Nations]. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (accessed: November 01, 2024). (In Russian)

2. U.S. Green Building Council. LEED v4 for Building Design and Construction. U.S. Green Building Council.

2023. Available at: <https://www.usgbc.org/leed> (accessed: February 08, 2025).

3. Building Research Establishment. BREEAM Technical Standards. Building Research Establishment. 2023. Available at: <https://www.breeam.com/> (accessed: February 10, 2025).

4. Japan Sustainable Building Consortium. CASBEE Manual. Institute for Building Environment and Energy Conservation. 2023. Available at: <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/> (accessed: February 10, 2025).

5. Uyzbayeva A. Sustainable Built Environment in Kazakhstan: The Way towards Better IAQ. *Proceedings 2018*, vol. 2, Iss. 22, pp. 1384. DOI: 10.3390/proceedings2221384.
6. Akhanova G., Nadeem A., Kim J. R. et al. A Framework of Building Sustainability Assessment System for the Commercial Buildings in Kazakhstan. *Sustainability*, 2019, vol. 11, Iss. 17, p. 4754. DOI: 10.3390/su11174754.
7. Assylbekov D., Nadeem A., Hossain M. et al. Factors Influencing Green Building Development in Kazakhstan. *Buildings*, 2021, vol. 11, Iss. 12, p. 634. DOI: 10.3390/buildings11120634.
8. Goubran Sh. On the Role of Construction in Achieving the SDGs. *Journal of Sustainability Research*, 2019;1:e190020. DOI: 10.20900/jsr20190020.
9. World Business Council for Sustainable Development. *SDG Sector Roadmaps: Guidelines for the Development of Sector Roadmaps to Achieve the SDGs*. WBCSD, 2018. URL: https://docs.wbcsd.org/2018/04/SDG_roadmap%20Guidelines.pdf (accessed: February 12, 2025).
10. Czajkowska A. The role of sustainable construction in sustainable development. *MATEC Web of Conferences* 174(3):01027. January, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201817401027.
11. Awwad T., Gruzin V., Kim V. Sustainable Reconstruction in Conditions of Dense Urban Development. *Current Geotechnical Engineering Aspects of Civil Infrastructures*. GeoChina 2018. *Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham, pp. 13–23. DOI: 10.1007/978-3-319-95750-0_2.
12. Awwad T., Gruzin A., Gruzin V. Upgrading of the Technologies of Soil Preparation and Construction of Foundations for Structures of Oil and Gas Industry. *Advanced Research on Shallow Foundations*. GeoMEast 2018. *Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham, 2019, pp. 64–72. DOI: 10.1007/978-3-030-01923-5_6
13. Goubran Sh., Cucuzzella C. Integrating the Sustainable Development Goals in Building Projects. *J Sustain Res*. 2019;1:e190010. DOI: 10.20900/jsr20190010.
14. Kanters J., Horvat M. The design process known as IDP: A discussion. *Energy Procedia*. 2022, vol. 30, pp. 1153–1162.
15. Goubran S., Cucuzzella C., Lee B. Sustainable Development Goals to support the design of an energy positive interpretation center for UQROP in Quebec, Canada: Conference Paper. 50th Annual Conference of the Environmental Design Research Association (EDRA 50), Brooklyn, NY. May 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334098292_Sustainable_Development_Goals_to_support_the_design_of_an_energy_positive_interpretation_center_for_UQROP_in_Quebec_Canada (accessed: February 12, 2025).

Received: November 05, 2024

Accepted: February 26, 2025

Author's information:

Talal AWWAD — PhD, Professor; dr.awwad@ymail.com

Alexandr A. PETRENKO — Master's Degree Student;

petrenkoalex2000@mail.ru



УДК 621.39

Моделирование действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

А. К. Канаев¹, Е. В. Опарин², Е. В. Опарина¹

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

²ЗАО «Институт телекоммуникаций», Российская Федерация, 194100, Санкт-Петербург, Кантемировская, д. 5, К. 5, лит. М

Для цитирования: Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Моделирование действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 263–273. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-263-273

Аннотация

Цель: Оценка показателей, характеризующих защищенность и уязвимость комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени при организации злоумышленником сетевой разведки с использованием ее инфраструктуры. **Методы:** Сбор, систематизация и анализ научно-технической информации; методы теории сетей и графов, математического моделирования, теории вероятностей. **Результаты:** В статье приведены результаты моделирования действий злоумышленника при организации сетевой разведки в сетях связи с использованием оборудования систем частотно-временного обеспечения, для чего построены полумарковская и имитационная модели действий злоумышленника, в которых отражены все этапы противоборства между организованным злоумышленником и системой информационной безопасности. Сформированные полумарковская и имитационные модели позволяют отразить вероятностно-временные характеристики процессов, отражающих противоборство организованного злоумышленника и системы информационной безопасности, произвести оценку указанных характеристик в зависимости от состава, количества и качества ресурсов, которыми располагает злоумышленник и система информационной безопасности. С помощью построенной полумарковской модели проведена верификация сформированной имитационной модели. **Практическая значимость:** Построенные модели могут быть применены для анализа процесса противоборства систем информационной безопасности и организованных злоумышленников, оценки деятельности злоумышленника и системы информационной безопасности, а также состояния систем частотно-временного обеспечения в зависимости от результатов противоборства. Полученные результаты по итогам моделирования могут быть учтены специалистами систем информационной безопасности при построении, модернизации и проектировании средств защиты систем точного времени и частоты.

Ключевые слова: Телекоммуникационная система, частотно-временное обеспечение, сетевая разведка, полумарковская модель, имитационная модель, атака, злоумышленник.

Введение

Стабильность и устойчивость процесса функционирования телекоммуникационных систем (ТКС) должны обеспечиваться непрерывным поддержанием режима синхронизации оборудования связи. Применение и использование современных телекоммуникационных средств и технологий требует использования как систем тактовой сетевой синхронизации (ТСС), так и систем, позволяющих обеспечить формирование, передачу и доставку сигналов единого времени (СЕВ). Следует отметить, что в настоящее время наблюдается комплексная трансформация инфраструктуры ТКС на новые сетевые технологии, которые характеризуются переходом от технологии коммутации каналов (PDH, SDH) к технологии коммутации пакетов (Ethernet/MPLS/IP), активным внедрением мобильных систем связи следующих поколений (например, 5G и 6G), а также непрерывным ужесточением требований к качественным характеристикам сигналов единого времени и частоты, что влечет за собой и трансформацию подходов к решению задач частотно-временного обеспечения (ЧВО). Дополнительные требования к качеству частотно-временных сигналов возникают в системах технологического назначения, например в сети связи железнодорожного транспорта, к которой предъявляются особые требования по обеспечению надежности, живучести и устойчивости процесса функционирования.

Комплексная система синхронизации и доставки шкалы времени необходима для формирования, хранения, передачи и доставки до целевых потребителей сигналов единого времени и частоты требуемой точности и стабильности, чтобы обеспечить устойчивость процесса функционирования всей телекоммуникационной системы [1–3].

Современные системы формирования, хранения, передачи и доставки сигналов единого времени и частоты представляют собой сложные

гетерогенные неоднородные структуры, которые включают в свой состав подсистемы ТСС и СЕВ, обеспечивающие потребителей необходимыми сигналами в сетях как коммутацией каналов, так и в сетях с коммутацией пакетов [1–5].

Комплексная система синхронизации и доставки шкалы времени в структуре ТКС представляет собой взаимоувязанный комплекс, обеспечивающий целостность процесса функционирования всей ТКС. Учитывая данный аспект, комплексная система синхронизации и доставки шкалы времени представляет собой один из первостепенных объектов атаки со стороны организованного злоумышленника. Нарушив процесс функционирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, злоумышленник впоследствии может нарушить процесс функционирования всей ТКС. Начальным этапом действий злоумышленника является сетевая разведка, от успешности проведения которой зависит результативность всей атаки в целом.

В статье приведены разработанные модели действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, которые включают в себя все ключевые этапы сетевой разведки и перечень при этом деструктивных воздействий [1, 6].

Полумарковская модель действий злоумышленника при организации сетевой разведки с использованием инфраструктуры систем частотно-временного обеспечения

Особым видом атаки в системах частотно-временного обеспечения является сетевая разведка, при которой злоумышленник может использовать результаты атаки, такие как информация о сетевых адресах и местоположениях источников сигналов ЧВО, сетевые задержки сигналов, частота сигналов или время, в которое они отправлены и

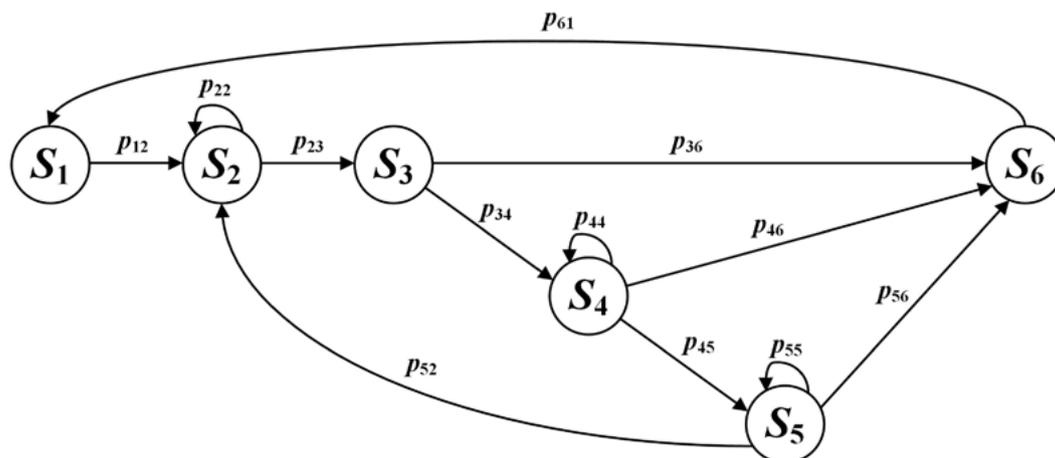


Рис. 1. Модель действий злоумышленника при ведении сетевой разведки в системах частотно-временного обеспечения

приняты. На основе данных сведений злоумышленник может построить топологию сети, идентифицировать узлы, даже если сетевые адреса скрыты или недоступны для просмотра.

Следует отметить, что сетевая разведка в системах частотно-временного обеспечения представляет собой частный случай проведения сетевой разведки в ТКС. Сетевая разведка в системах ЧВО может быть проведена при помощи прослушивания трафика сигналов единого времени и частоты, а также путем отправки вредоносных пакетов и сбора ответов.

Процесс сетевой разведки в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени содержит следующие этапы:

- организация доступа к системе частотно-временного обеспечения;
- сбор необходимых данных;
- маскировка действий по ведению сетевой разведки.

Примем, что злоумышленник для ведения сетевой разведки в системах ЧВО обладает комплексом сетевой разведки, реализующим процессы сетевого сканирования, чтения информационных потоков, поиска, технического анализа, контроля трафика и местоопределения источников трафика.

Организация доступа при ведении сетевой разведки в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени является предварительным этапом и включает в себя следующие действия:

- сбор исходных данных о комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени;
- планирование ведения сетевой разведки;
- организация доступа к интересующим сегментам комплексной системы синхронизации и доставки сигналов времени, а также к необходимой информации.

Таким образом, обобщенная модель действий злоумышленника при ведении сетевой разведки примет следующий вид (рис. 1).

Разработанная модель (рис. 1) включает все основные этапы ведения сетевой разведки в системах ЧВО, в том числе сетевое сканирование, чтение сетевых потоков, определение источников трафика ЧВО. Построенная модель (рис. 1) содержит в себе следующие состояния [7–9]:

- S_1 — начальное состояние, при котором злоумышленник проводит сбор исходных данных, подключение комплекса сетевой разведки к целевому сегменту объекта атаки;
- S_2 — сетевое сканирование;

– S_3 — анализ результатов сетевого сканирования и построение злоумышленником топологии системы ЧВО на основе результатов сетевого сканирования;

– S_4 — состояние осуществления чтения информационных потоков протоколов передачи сообщений сигналов единого времени и частоты;

– S_5 — анализ результатов чтения информационных потоков и местоопределение целевых узлов системы ЧВО по сетевым задержкам и содержанию сообщений сигналов единого времени и частоты;

– S_6 — состояние обобщения полученной информации для проведения более сложных и разрушительных атак.

Оценку стационарных характеристик процесса сетевой разведки, таких как вероятность нахождения в каждом состоянии и среднее время атаки, можно произвести с использованием аппарата полумарковских процессов, исходными данными при этом выступают переходные вероятности и функции распределения условных случайных времен пребывания в каждом состоянии [7–9].

Стационарная вероятность пребывания в конкретном состоянии сетевой разведки можно определить по выражению (1) [9–12]:

$$\pi_i = \frac{P_i T_i}{\sum_{j \in S} P_j T_j}, \quad (1)$$

где P_i, P_j — стационарная вероятность пребывания вложенной однородной марковской цепи в соответствующих состояниях;

T_i, T_j — математические ожидания времени пребывания в конкретном состоянии сетевой разведки;

S — число состояний.

Среднее времени проведения сетевой разведки можно оценить при помощи метода миноров, используя выражения (2) и (3) [9]:

$$P_i = \frac{D_i}{\sum_{j=1}^n D_j}, \quad (2)$$

где $D_i(D_j)$ — соответствующий минор, образуемый при обработке строк и столбцов матрицы D .

$$D = \begin{pmatrix} 1-p_{11} & -p_{12} & \dots & -p_{17} \\ -p_{21} & 1-p_{22} & \dots & -p_{27} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -p_{71} & -p_{72} & \dots & 1-p_{77} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, среднее время сетевой разведки можно оценить по формуле (4) [9, 13–15]:

$$T_A = \frac{\sum_{i \in S_A} P_i T_i}{\sum_{i \in S_+} P_i \sum_{j \in S_A} P_{ij}}, \quad (4)$$

где S_+ — множество пограничных состояний.

Для проведения моделирования в качестве исходных данных примем матрицу переходных вероятностей (5):

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,7 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0,1 & 0,8 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Дополнительно примем, что функции распределения условных случайных времен пребывания в каждом состоянии сетевой разведки $F_{ij}(t)$ распределены по экспоненциальному закону согласно матрице интенсивностей (6):

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0,005 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,1 & 4 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0,1 & 4 \\ 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{ч}^{-1}. \quad (6)$$

Путем проведения вычислений получены следующие вероятности нахождения в состояниях процесса сетевой разведки в случайный момент времени (7):

$$\pi_i = (0,729 \ 0,004 \ 0,067 \ 0,016 \ 0,001 \ 0,182) . \tag{7}$$

Среднее время сетевой разведки составляет (8):

$$\begin{aligned} T_A &= \frac{\sum_{i \in S_A} P_i T_i}{\sum_{i \in S_+} P_i \sum_{i \in \bar{S}_A} p_{ij}} = \\ &= \frac{(P_1 T_1 + P_2 T_2 + P_3 T_3 + P_4 T_4 + P_5 T_5)}{(P_3 p_{36} + P_4 p_{46} + P_5 p_{56})} = \\ &= 224,17 \text{ ч} \approx 9,34 \text{ сут.} \end{aligned} \tag{8}$$

Злоумышленник будет способен проводить сетевую разведку в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени в течение 9,34 суток. Следует заметить, что в указанное время входит как активный процесс сетевой разведки путем прослушивания, отправки запросов и получения ответов, так и предварительный сбор исходных данных, а также настройка комплекса сетевой разведки.

Построенная модель позволяет произвести оценку влияния интенсивности действий злоумышленника на среднее время сетевой разведки. Интенсивность действий злоумышленника определяется его технической оснащенностью и уровнем подготовки. При большем количестве ресурсов и технической оснащенности злоумышленника атаки становятся более интенсивными, что влечет снижение времени прохождения конкретного рубежа защиты [13–15].

Зависимости, отражающие оценку влияния интенсивности действий злоумышленника на среднее время сетевой разведки, приведены на рис. 2–5.

Кроме того, следует отметить, что переходные вероятности в разработанной модели характеризуют стратегию атаки злоумышленника, а также соотношение сил и ресурсов злоумышленника и систем информационной безопасности.

Например, в состоянии S_2 злоумышленник может провести дополнительное сканирование узлов, а может перейти к следующему этапу по формализации полученных данных для составления сетевой архитектуры. Аналогичным образом в смежных состояниях злоумышленник может

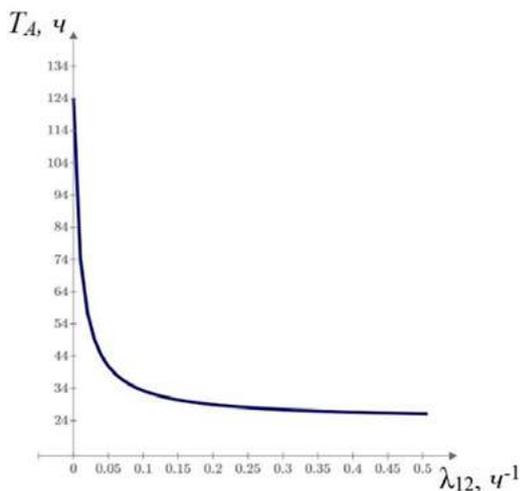


Рис. 2. Зависимость времени сетевой разведки T_A от интенсивности λ_{12}

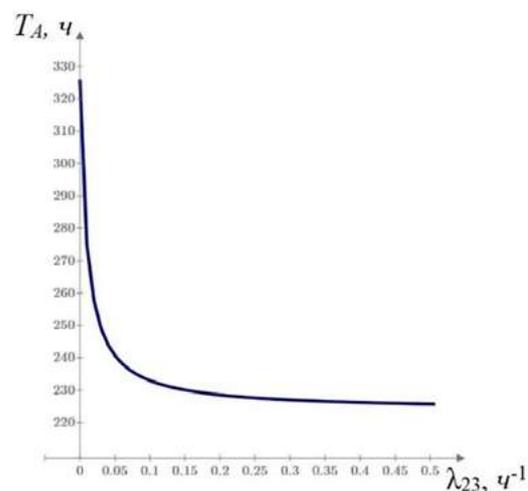


Рис. 3. Зависимость времени сетевой разведки T_A от интенсивности λ_{23}

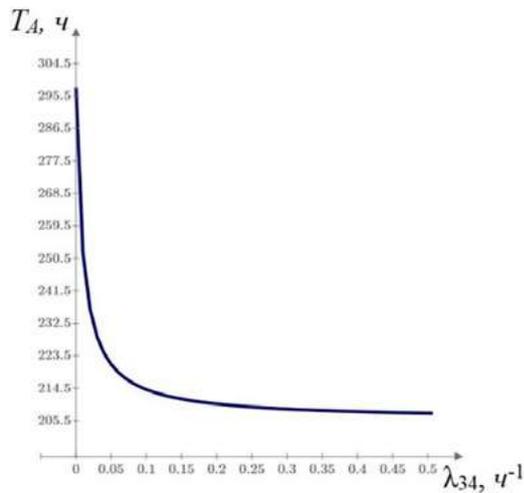


Рис. 4. Зависимость времени сетевой разведки T_A от интенсивности λ_{34}

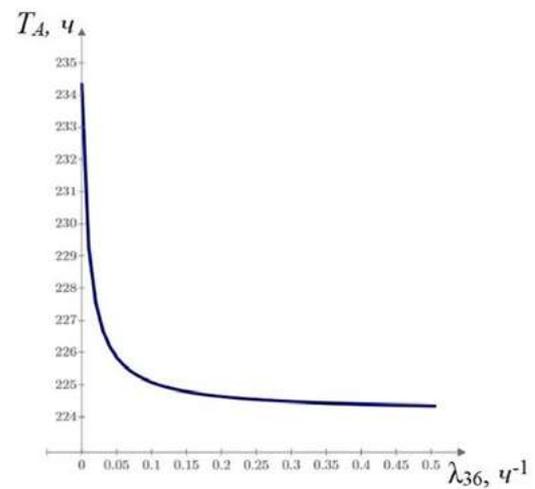


Рис. 5. Зависимость времени сетевой разведки T_A от интенсивности λ_{36}

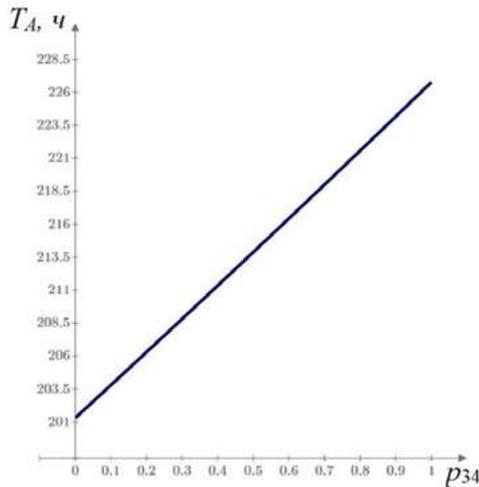


Рис. 6. Зависимость времени сетевой разведки T_A от значения переходной вероятности p_{34}

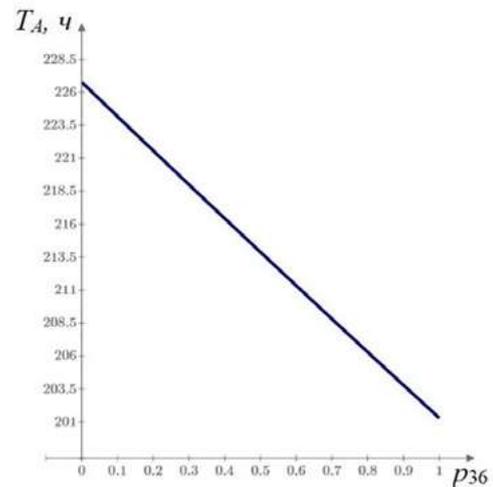


Рис. 7. Зависимость времени сетевой разведки T_A от значения переходной вероятности p_{36}

действовать различным образом, исходя из конкретной ситуации по ведению сетевой разведки.

Разработанная полумарковская модель позволяет произвести оценку стационарных характеристик процесса проведения сетевой разведки в зависимости от значений переходных вероятностей, а значит, от выбранных стратегий противоборства злоумышленника и системы информационной безопасности. На рис. 6, 7 приведены зависимости времени сетевой разведки от значений вероятностей переходов p_{34} и p_{36} .

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом интенсивности действий злоумышленника снижается время проведения сетевой разведки, однако существует определенный предел, при котором рост интенсивности действий злоумышленника не приносит ему ожидаемых результатов. Кроме того, разработанная полумарковская модель позволяет проводить оценку стационарных характеристик сетевой разведки от интенсивности, стратегии и технической оснащенности действий злоумышленника и служб

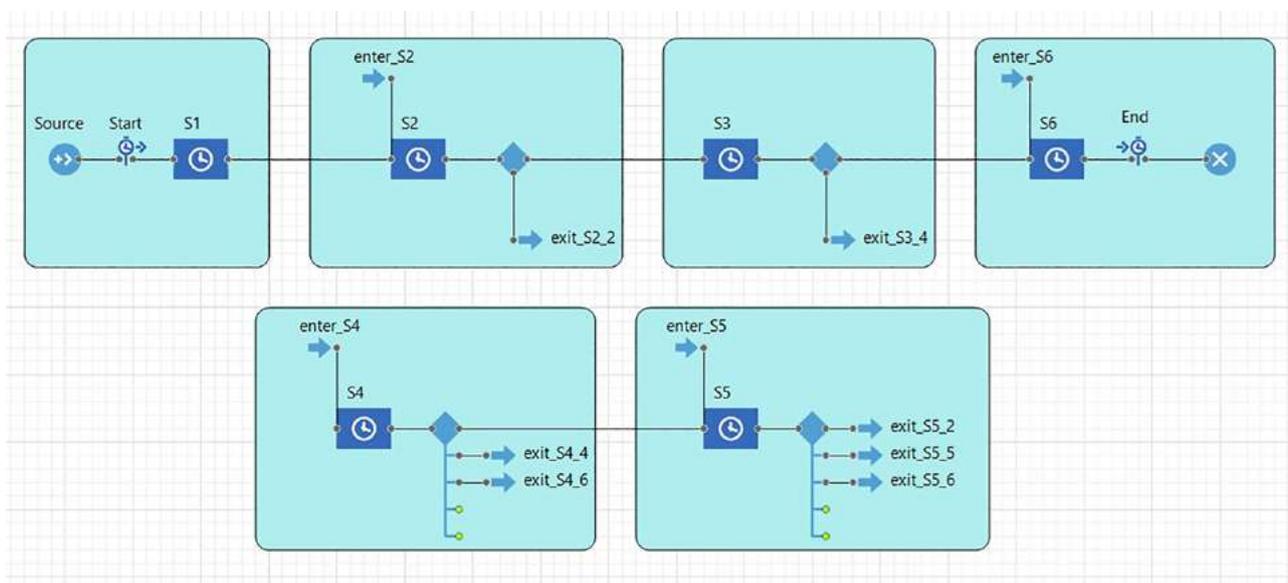


Рис. 8. Имитационная модель процесса проведения сетевой разведки организованным злоумышленником в системах частотно-временного обеспечения

информационной безопасности. Также следует отметить, что получаемые результаты могут быть основой при проведении модернизации средств защиты систем частотно-временного обеспечения.

Имитационная модель действий злоумышленника при ведении сетевой разведки с использованием инфраструктуры систем частотно-временного обеспечения

Аппарат полумарковских процессов сложен с точки зрения увеличения числа исходных данных и перечня состояний, поэтому с целью применения большего набора исходных данных была разработана имитационная модель действий злоумышленника при ведении сетевой разведки в системах ЧВО. Имитационная модель построена в среде *AnyLogic* (рис. 8).

С помощью построенной полумарковской модели была проведена верификация имитационной модели. Исходные данные для верификации соответствуют исходным данным согласно расчетам по разработанной полумарковской модели.

В результате проведенного имитационного моделирования получена следующая гистограмма времени реализации сетевой разведки (рис. 9).

Результаты имитационного моделирования: среднее время реализации атаки составляет 220 часов, что составляет примерно 9,17 суток. Как видно, результаты имитационного моделирования в целом соответствуют расчетам согласно разработанной полумарковской модели.

Таким образом, с помощью полумарковской модели проведена верификация имитационной модели процесса проведения сетевой разведки в комплексной системе синхронизации и доставки шкалы времени. Дальнейшее использование имитационной модели позволит расширить объем вычислений, перечень используемых вероятностных распределений и перечень состояний процесса проведения атаки.

Заключение

Возрастание потребности в частотно-временных сигналах в современных и перспективных сетях связи, активное применение и рас-

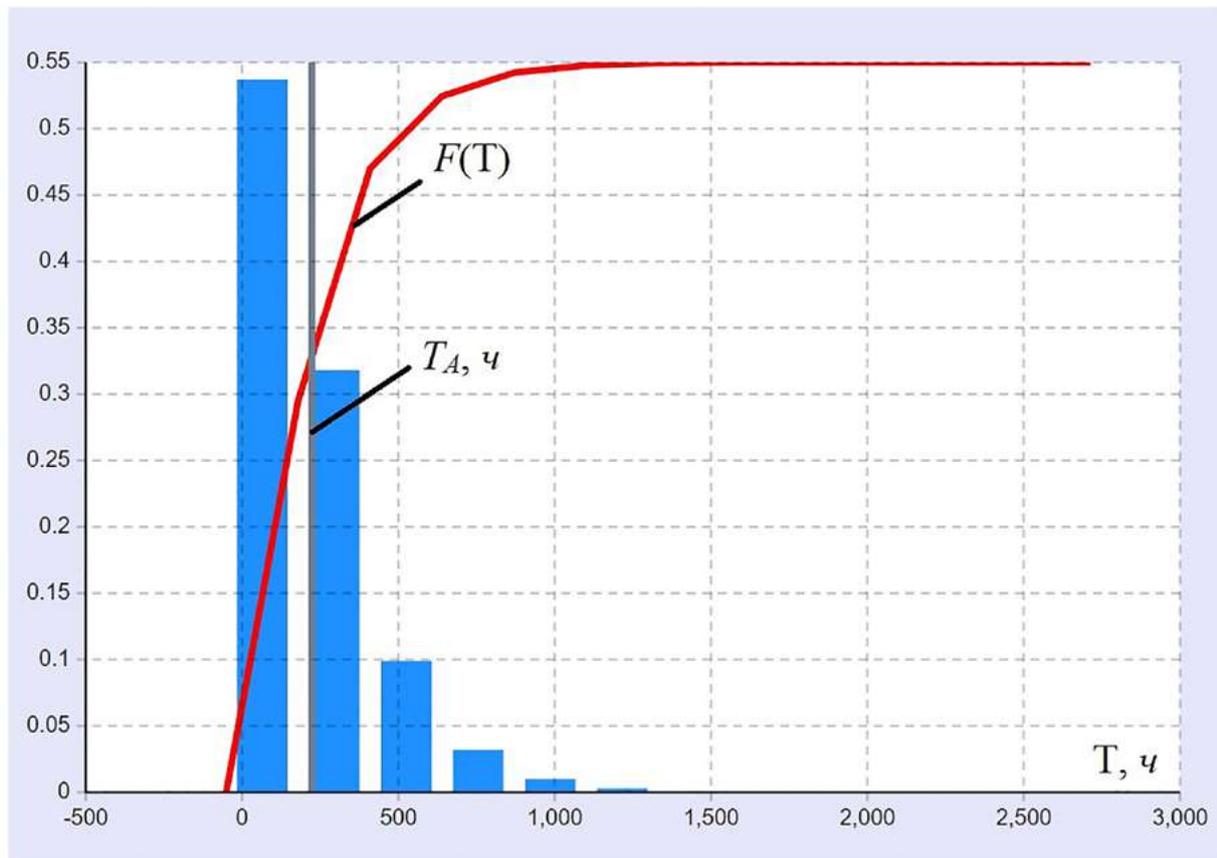


Рис. 9. Гистограмма времени реализации сетевой разведки организованным злоумышленником в системах частотно-временного обеспечения

пространение аппаратуры частотно-временного обеспечения влечет за собой поэтапное возрастание угроз и потенциальных атак на комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени. Одной из наиболее опасных атак на системы частотно-временного обеспечения является сетевая разведка, реализация которой возможна в сетях связи, построенных на различных сетевых технологиях и с применением различных систем передачи. Для оценки деятельности злоумышленника при ведении сетевой разведки в системах ЧВО разработаны соответствующие полумарковская и имитационная модели. С помощью полумарковской модели была верифицирована имитационная модель.

Построенные модели универсальны и позволяют производить оценку действий злоумышленника на всех этапах сетевой разведки. Разработанные полумарковская и имитационная модели информационных воздействий отличаются учетом качественного и количественного состава ресурсов противоборствующих сторон в процессе реализации атаки, которые выражаются через интенсивности и вероятности переходов между состояниями.

Полученные при моделировании результаты могут быть учтены при построении систем информационной безопасности комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени.

Список источников

1. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учебное пособие для вузов / А. В. Рыжков. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 270 с.

2. Ванчиков А. С. Синхронизация в современных сетях операторского класса / А. С. Ванчиков // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 8. — С. 19–20.

3. Канаев А. К. Рекомендации МСЭ-Т в области синхронизации инфотелекоммуникационных систем / А. К. Канаев, А. К. Тощев // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 10. — С. 8–14.

4. Рыжков А. В. Средства и способы обеспечения единого точного времени / А. В. Рыжков, Е. О. Новожилов // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 12. — С. 7–11.

5. Мазуренко Д. К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов / Д. К. Мазуренко // Т-Сотт — Телекоммуникации и Транспорт. — 2017. — Т. 11. — № 8. — С. 4–8.

6. Добрышин М. М. Предложение по совершенствованию систем противодействия DDoS-атакам / М. М. Добрышин // Телекоммуникации. — 2018. — № 10. — С. 32–38.

7. Канаев А. К. Полумарковская модель действий злоумышленника при атаке на систему управления сетью тактовой сетевой синхронизации / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, М. А. Сахарова // Информация и космос. — 2020. — № 4. — С. 46–56.

8. Канаев А. К. Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 505–514.

9. Шубинский И. Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. — Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2012. — 216 с.

10. Ефремов М. А. Обзор подходов к определению актуальных угроз информации телекоммуникационным системам и предложения по их совершенствованию / М. А. Ефремов, И. В. Калуцкий, М. О. Таныгин и др. // Телекоммуникации. — 2017. — № 5. — С. 27–33.

11. Смирнов Р. А. Анализ методик оценки угроз безопасности информации / Р. А. Смирнов, С. Н. Новиков // Телекоммуникации. — 2023. — № 7. — С. 24–27.

12. Саенко И. Б. Модель угроз ресурсам ИТКС как ключевому активу критически важного объекта инфраструктуры / И. Б. Саенко, О. С. Лаута, М. А. Карпов и др. // Электросвязь. — 2021. — № 1. — С. 36–44.

13. Котенко И. В. Метод раннего обнаружения кибератак на основе интеграции фрактального анализа и статистических методов / И. В. Котенко, И. Б. Саенко, О. С. Лаута и др. // Первая миля. — 2021. — № 6. — С. 64–71.

14. Саенко И. Б. Модели компьютерных атак на программно-конфигурируемые сети / И. Б. Саенко, И. В. Котенко, О. С. Лаута и др. // Научные исследования в космических исследованиях Земли. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 37–47.

15. Коцыняк М. А. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М. А. Коцыняк, А. И. Осадчий, М. М. Коцыняк и др. — СПб.: ЛО ЦНИИС, 2014. — 126 с.

Дата поступления: 20.12.2024

Решение о публикации: 19.02.2025

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф.

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, ведущий специалист; oparuh@mail.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доц.

Modelling Attacker Network Reconnaissance Using the Environment of an Integrated Time Scale Synchronization and Delivery System

A. K. Kanaev¹, E. V. Oparin², E. V. Oparina¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²JSC “Institute of Telecommunications”, 5, K. 5, lit. M, Kantemirovskaya, Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

For citation: Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Modelling Attacker Network Reconnaissance Using the Environment of an Integrated Time Scale Synchronization and Delivery System // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 263–273. (In Russian) DOI: 10.20295/22 23-9987-2025-1-263-273

Summary

Purpose: To assess the security and vulnerability techniques for a complex system of time scale synchronization and delivery in case of attacker network reconnaissance in the net environment. **Methods:** Collection, systematization and analysis of scientific and technical information; methods of network and graph theory, mathematical modelling, and probability theory. **Results:** This paper presents the results of modelling attacker actions during network reconnaissance in communication networks using time-frequency support systems. A semi-Markov and simulation models of attacker behaviour were built reflecting all phases of the confrontation between an organised attacker and an information security system. The semi-Markov and simulation models make it possible to illustrate probability and time characteristics of processes reflecting the confrontation between an organized attacker and an information security system as well as to evaluate these characteristics depending on the content, quantity and quality of the resources available to the attacker and the information security system. The verification of the generated simulation model was carried out using the constructed semi-Markov model. **Practical significance:** The constructed models can be used to analyze the process of confrontation between information security systems and organized intruders, to assess attacker activities and those of the information security system, as well as to evaluate the time-frequency support systems judging by the results of the confrontation. The simulation results obtained can be used by information security specialists in building, modernizing, and designing security tools for time and frequency reference systems.

Keywords: Telecommunication system, time-frequency support, network reconnaissance, semi-Markov model, simulation model, attack, attacker.

References

1. Ryzhkov A. V. *Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Frequency-time support in telecommunication networks: a textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2021, 270 p. (In Russian)
2. Vanchikov A. S. Sinkhronizatsiya v sovremennykh setyakh operatorskogo klassa [Synchronization in modern carrier-class networks]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2018, Iss. 8, pp. 19–20. (In Russian)
3. Kanaev A. K., Toshchev A. K. Rekomendatsii MSE-T v oblasti sinkhronizatsii infotelekomunikatsionnykh sistem [ITU-T Recommendations in the field of synchronization of infotelecommunication systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2018, Iss. 10, pp. 8–14. (In Russian)
4. Ryzhkov A. V., Novozhilov E. O. Sredstva i sposoby obespecheniya edinogo tochnogo [Means and methods for ensuring a single exact time]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2018, Iss. 12, pp. 7–11. (In Russian)

5. Mazurenko D. K. Aspekty postroeniya sistemy chastotno-vremennoy setevoy sinkhronizatsii signalov [Aspects of constructing a system of frequency-time network synchronization of signals]. *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2017, vol. 11, Iss. 8, pp. 4–8. (In Russian)
6. Dobryshin M. M. Predlozhenie po sovershenstvovaniyu sistem protivodeystviya DDoS-atakam [Proposal for improving systems for countering DDoS attacks]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2018, Iss. 10, pp. 32–38. (In Russian)
7. Kanaev A. K., Oparin E. V., Sakharova M. A. Polumarkovskaya model' deystviy zloumyshlennika pri atake na sistemu upravleniya set'yu taktovoy setevoy sinkhronizatsii [Semi-Markov model of an intruder's actions in an attack on a network clock synchronization control system]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2020, Iss. 4, pp. 46–56. (In Russian)
8. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Obespechenie informatsionnoy bezopasnosti sistemy taktovoy setevoy sinkhronizatsii na osnove ee entropiynogo analiza [Ensuring information security of a network clock synchronization system based on its entropy analysis]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 505–514. (In Russian)
9. Shubinskiy I. B. *Strukturnaya nadezhnost' informatsionnykh sistem. Metody analiza* [Structural reliability of information systems. Analysis methods]. Ul'yanovsk: Oblastnaya tipografiya "Pechatnyy dvor" Publ., 2012, 216 p. (In Russian)
10. Efremov M. A., Kalutskiy I. V., Tanygin M. O. Obzor podkhodov k opredeleniyu aktual'nykh ugroz informatsii telekommunikatsionnym sistemam i predlozheniya po ikh sovershenstvovaniyu [Review of approaches to identifying current threats to information in telecommunication systems and proposals for their improvement]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2017, Iss. 5, pp. 27–33. (In Russian)
11. Smirnov R. A., Novikov S. N. Analiz metodik otsenki ugroz bezopasnosti informatsii [Analysis of methods for assessing information security threats]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2023, Iss. 7, pp. 24–27. (In Russian)
12. Saenko I. B., Lauta O. S., Karpov M. A. et al. Model' ugroz resursam ITKS kak klyuchevomu aktivu kriticheski vazhnogo ob'ekta infrastruktury [Model of threats to ITCS resources as a key asset of a critical infrastructure facility]. *Elektrosvyaz'* [Telecommunications]. 2021, Iss. 1, pp. 36–44. (In Russian)
13. Kotenko I. V., Saenko I. B., Lauta O. S. et al. Metod rannego obnaruzheniya kiberatak na osnove integratsii fraktal'nogo analiza i statisticheskikh metodov [Method of early detection of cyberattacks based on the integration of fractal analysis and statistical methods]. *Pervaya milya* [The first mile]. 2021, Iss. 6, pp. 64–71. (In Russian)
14. Saenko I. B., Kotenko I. V., Lauta O. S. et al. Modeli komp'yuternykh atak na programmno-konfiguriruyemye seti [Models of computer attacks on software-defined networks]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [Science-intensive technologies in space research of the Earth]. 2023, vol. 15, Iss. 1, pp. 37–47. (In Russian)
15. Kotsynyak M. A., Osadchiy A. I., Kotsynyak M. M. et al. *Obespechenie ustoychivosti informatsionno-telekommunikatsionnykh setey v usloviyakh informatsionnogo protivoborstva* [Ensuring the stability of information and telecommunication networks in the conditions of information confrontation]. St. Petersburg: LO TsNIIS Publ., 2014, 126 p. (In Russian)

Received: December 20, 2024

Accepted: February 19, 2025

Author's information:

Andrey K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor
Evgeny V. OPARIN — PhD in Engineering, Leading Specialist; onapuh@mail.ru
Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor