ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

peer-review journal

transsyst.ru

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2782-3733 (Online)

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

Электронный рецензируемый научный журнал
Выходит ежеквартально – 4 раза в год
Основан в 2013 году

ИНДЕКСАЦИЯ

РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)
ВАК (Высшая аттестационная комиссия)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А.Ю. Гнатенко
Редактор сайта М.Д. Боярский
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова
Верстка Т.С. Антонова

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-81789 от 31.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

Сетевой электронный журнал "Транспортные системы и технологии" публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

Журнал отбирает материал для публикации из числа присланных для рассмотрения рукописей. В ходе отбора проводится независимое двойное слепое рецензирование членами редакционной коллегии и внешними экспертами.
Для публикации рукопись, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: http://trassyst.ru/
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 9, № 2 **2023**

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Панычев Александр Юрьевич
к.э.н., доцент, ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Титова Тамила Семёновна
д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Первый проректор – Проректор по науке ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР
Никитин Виктор Валерьевич
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Богданов Александр Владимирович, д.физ.-мат.н., профессор СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;
Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор Заведующий кафедрой «Экономика транспорта», Директор Института прикладной экономики и бухгалтерского учета железнодорожного транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Клюшпис Йоханнес, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;
Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д.т.н., профессор, президент РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Кручинина Ирина Юрьевна, д.т.н., директор ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия;
Ли Вэйли, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;
Линь Гобинь, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Ледяев Александр Петрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены», ведущий научный сотрудник Научно-аналитической группы по развитию городского транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Ма Чжисюнь, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Мулюков Радик Рафикович, член-кор. РАН, д.физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;
Ни Фэй, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР;
Никитенко Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Подсорин Виктор Александрович, д.э.н., профессор РУТ (МИИТ), Москва, Россия ;
Повадол Сирирангси, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паняпиватского института управления, Паккред, Таиланд;
Смирнов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Мосты» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Смирнов Сергей Александрович, Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок имени А.А. Зайцева ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Соломин Владимир Александрович, д.т.н., профессор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Стэфан Ричард, д.т.н., полный профессор Факультета электротехники, заведующий Лабораторией электрических машин Федерального университета Рио-де-Жанейро, Рио-де-Жанейро, Бразилия;
Талантова Клара Васильевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Терешина Наталья Петровна, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Хан Хьёнг-Сук, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL ISSN 2782-3733 (Online)

FOUNDER AND PUBLISHER
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
St. Petersburg, Russia

"MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"
Electronic peer-reviewed research journal
Issued 4 times a year (quarterly)
Established in 2013

INDEXING
eLibrary (Russian Science Citation Index)
Higher Attestation Commission of Russia's Ministry of Education and Science (VAK)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

CONTACTS
Address: 190031, St. Petersburg, 115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
Website: www.transsyst.ru
Phone: +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
Translation into English A.Yu. Gnatenko
WEB- Editor M.D. Boyarsky
The Executive Editor O.Yu. Smirnova
Layout Editor T.S. Antonova

AIMS & SCOPE
Network electronic journal "Modern Transportation Systems and Technologies" publishes articles of a fundamental nature and application areas, as well as review articles pertaining to all types of transport technology

JOURNAL CONTENT SELECTION
The journal selects material based on the double-blind peer-review conducted by members of the editorial board and external experts.
To be published, the manuscript and all accompanying files should be sent to the editorial team through a personal account on the journal's website at: http://trassyst.ru/
The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2023

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 9, Issue 2 **2023**

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF
Aleksandr Y. Panychev
PhD, Associate professor, rector PGUPS, St. Petersburg, Russia

Deputy EDITOR-IN-CHIEF
Tamila S. Titova
Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Scientific Work PGUPS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

THE SCIENTIFIC EDITOR
Viktor V. Nikitin
Dr.Sc., Professor, Professor Departments Electric Power Traction and Theoretical Bases of Electrical Engineering PGUPS, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD
Aleksandr V. Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
Vladimir D. Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Natal'ya A. Zhuravleva, Dr. Economics, Professor Head of the Department of Economics of Transport, Director of the Institute of Applied Economics and Accounting of Railway Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Johannes O. Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;
Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Irina Kruchinina, Dr.Sc., Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;
Weili Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;
Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China ;
Aleksandr P. Ledyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Tunnels and Subways", Leading Research Fellow Scientific and Analytical Group for the Development of Urban Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;
Radik R. Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;
Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;
Vladimir A. Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Viktor A. Podsorin, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;
Sirirangsi Poovadol, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;
Vladimir N. Smirnov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Bridges" PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Sergey A. Smirnov, Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Vladimir A. Solomin, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Richard Magdalena Stephan, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;
Klara V. Talantova, Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures
Natalya Tereshina, Dr. Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Han Hyung-Suk, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОБЗОРЫ		**REVIEWS**
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Техносферная безопасность транспортных систем Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Пути совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта	5	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Technosphere safety of transport systems Titova T.S., Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		**ORIGINAL STUDIES**
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей	19	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Vataev A.S., Dedova O.A., Nikitin V.V. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Кузнецов А.А., Изварин М.Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов	33	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Kuznetsov A.A., Izvarin M.Yu. Use of regenerative braking energy in the passenger coaches heating system
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Лисов А.А., Возмилов А.Г., Кулева Н.Ю., Согрин А.И., Закиров Р.А.,Илимбетов Р.Ю. Выбор тягового электродвигателя для Арктического электротранспорта	44	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Lisov A.A., Vozmilov A.G., Kuleva N.Yu., Sogrin A.I., Zakirov R.A., Ilimbetov R.Yu. Selection of a traction electric motor for Arctic electric transport
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций	57	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Ground transport and logistics facilities and complexes Sugorovsky A.V., Sugorovsky A.V. A typical simulation passenger module for a comprehensive study of railway directions, junctions and stations

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования	66	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Fedoseev N.A., Svalbova V.A., Alekseev S.V. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге	83	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Makhonko A.A., Malkov A.V., Belyi A.A., Antonyuk A.A. Experience in operating the monitoring system for a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Журавлева Н.А., Печкуров В.А. Анализ состояния рынка вагонов-цистерн в России и оптимизация операционных моделей компаний операторов	97	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Zhuravleva N.A., Pechkurov V.A. Analysis of the tank car market in Russia and optimization of operating models of operator companies
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Перспективы магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза	110	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Smirnov S.A., Smirnova O.Yu. Prospects of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian economic union

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Техносферная безопасность транспортных систем

УДК [UDC] 551.583.2
DOI 10.17816/transsyst2023925-18

© Т.С. Титова, Р.Г. Ахтямов, Н.А. Мещерякова
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЛАНА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

Цель: Разработка комплекса рекомендаций по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта.

Методы: Методом исследования являлся анализ факторов климатического риска, и их динамика, а также особенности возникновения отказов на устройствах связи и автоматики в условиях меняющегося климата.

Результаты: Предлагаемые направления совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта заключаются в учете априорной вероятности при оценке климатических рисков для объектов транспорта, а также рассмотрении влияния экзогенных геологических процессов на транспортные объекты. Показано, что объектами транспортной инфраструктуры, испытывающими существенное влияние со стороны меняющих факторов климатического риска, являются системы связи и автоматики. Инклюзивность при разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта может достигаться, в том числе форсированной подготовкой кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта и рассмотрение технологий поглощения парниковых газов как мер по адаптации к изменениям климата в области транспорта.

Заключение: Учет предложений по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта позволит акцентировать внимание на уязвимых к изменениям климата системам, обеспечить необходимый уровень профессиональной подготовки кадров для реализации плана адаптации, включить технологии поглощения парниковых газов в деятельность отрасли и обеспечить участие в разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта всех заинтересованных сторон.

Ключевые слова: адаптация к изменению климата; природные стихийные явления; план адаптации; климатические риски; технологии поглощения выбросов; устойчивость; управление рисками; изменение климата.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS
Field – Technosphere safety of transport systems

© T.S. Titova, R.G. Akhtyamov, N.A. Mescheriakova
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

WAYS TO IMPROVE CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLAN OF THE TRANSPORT

Aim: Development of recommendations for improving the climate change adaptation plan in the field of transport.

Methods: The research method was the analysis of climate risk factors and their dynamics, as well as the features of failures in communication and automation devices in a changing climate.

Results: The proposed directions for improving the climate change adaptation plan in the field of transport are to take into account a priori probability when assessing climate risks for transport facilities, as well as considering the impact of exogenous geological processes on transport facilities. It is shown that the transport infrastructure that are significantly affected by the changing factors of climate risk are communication and automation systems. Inclusiveness in the development of climate change adaptation activities in the field of transport can be achieved, including accelerated training of personnel for the implementation of the climate change adaptation plan in the field of transport and the consideration of greenhouse gas absorption technologies as climate change adaptation measures.

Conclusion: Taking into account proposals for improving the climate change adaptation plan in the field of transport will focus on climate-vulnerable systems, provide the necessary level of professional training for the implementation of the adaptation plan, include greenhouse gas absorption technologies in the industry and ensure participation in the development of measures to adaptation to climate change of all stakeholders.

Key words: adaptation to climate change; natural disasters; adaptation plan; climate risks; negative emissions technologies; stability; management of risks; climatic change.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время динамика климатических изменений наблюдается по всему миру, при этом особенностью данного процесса является то, что оно фиксируется как на общемировом, так и на локальном уровне. Драйвером ускорения глобального изменения климата является использование ископаемого топлива в качестве энергоресурса. Это приводит к антропогенно обусловленному росту содержания парниковых газов в атмосфере. Реализации концепции устойчивого развития с поэтапным сокращением выбросов парниковых газов основывается, как на принятии дифференцированного подхода к использованию энергоресурсов, так и на внесении корректив в деятельность различных отраслей, в том числе транспортной.

Во исполнение Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года [1] Министерство транспорта утвердило План адаптации к изменениям климата в области транспорта [2] с предоставлением ежегодных отчетов о ходе выполнения мероприятий плана. Субъектами адаптации, относящимися к железнодорожной отрасли, определены строительство автомобильных и

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

железных дорог, междугородные и международные пассажирские перевозки, грузовые перевозки.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

В качестве климатических рисков для транспортной отрасли отмечается, что изменение климата и его последствия могут негативно сказаться как на строительстве, так и на эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. В частности, таяние многолетней мерзлоты создает риск полной или частичной утраты функциональности объектов транспортной инфраструктуры в связи с тем, что около 70 % инфраструктуры в зоне Арктики расположены в районах таяния многолетнемерзлых грунтов. Сезонное оттаивание или пучение грунта, а также термокарстовые просадки приводят к повреждению линейных сооружений инфраструктуры. При снижении количества морского льда вдоль побережья повышается вероятность волнового воздействия, в том числе на прилегающие к береговой зоне железные дороги. Отмечается рост среднемесячных и максимальных месячных температур за период 2010–2021 гг. (около 5 ^{o}C), что повышает вероятность природных пожаров и увеличение частоты волн жары сопровождающихся экстремально высокими температурами в течение нескольких дней подряд, что приводит к деформации рельсов и последующее уменьшение скорости поездов (а также повышение вероятности схода составов с рельс), и повышает вероятность отказа оборудования сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

В качестве пороговых значений для деятельности и показателей уязвимости выделено то, что при температурах ниже минус 25 ^{o}C происходит деформация металлических конструкций, укорачивание рельсов, замораживание пассажирских вагонов. Температура выше 25 ^{o}C также вызывает деформации металлических конструкций и изгиб рельсовых путей.

Отмечено, что за последние годы в 70 субъектах федерации зафиксировано 1556 случаев полной либо частичной утраты функциональности объектов транспортной инфраструктуры, в том числе железнодорожной: Дальневосточный округ – 41 случай; Сибирский округ – 14 случаев; Северо-Западный округ – 5 случаев.

В качестве новых возможностей для развития в связи с изменением климата отмечается, что сокращение периода отрицательных температур воздуха повышает благоприятность условий работы транспорта и создает предпосылки для увеличения срока эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

К приоритетным адаптационным мероприятиям отнесено:

– внесение изменений в акты Правительства, федеральных органов исполнительной власти, нормативно-методические документы направленных на учет меняющегося климата при проектировании, строительстве, эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры;

– создание системы мониторинга инженерно-геокриологических условий для наблюдения за состоянием линейных объектов инфраструктуры и разработка отраслевой методики расчета климатических рисков и оценки последствий изменения климата;

– оценка климатических рисков, обследование, адаптация и приведение в нормативное состояние искусственных сооружений на полигоне Крымской железной дороги и Восточном полигоне железных дорог;

– создание системы мониторинга изменения климата и чрезвычайных ситуаций природного характера на автомобильных дорогах, а также разработка цифровой платформы с интерактивной картой автомобильных дорог с прогнозными рисками воздействия меняющегося климата;

– проведение исследований по тематике влияния климатических рисков на оказание услуг по страхованию транспортным компаниям;

– формирование перечня объектов транспортной инфраструктуры федерального значения уязвимых к последствиям климатических изменений;

– создание испытательного полигона по апробации новых вяжущих материалов для строительства и обслуживания автомобильных дорог, в том числе разработка регламентов их применения;

– повышение пропускной способности внутренних водных путей, устранение негативного влияния изменения климата и обеспечение глубин, необходимых для судоходства.

В результате оценки климатических рисков для транспортного комплекса РФ выделены следующие климатические факторы и уровни риска:

– таяние многолетнемерзлых грунтов: весьма опасный уровень (70 % объектов транспортной инфраструктуры Арктической зоны);

– повышение средних температур, периоды аномальной жары/засухи: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры);

– изменение среднего уровня моря, усиление разрушительной силы штормов: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры расположенных в прибрежных районах);

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

– изменение интенсивности и частоты экстремальных осадков (наводнения и засухи): весьма опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры);

– природные пожары: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры на территории регионов с высоким риском возникновения природных пожаров);

– сильный ветер/грозы: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЛАНА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

Изменение климата повышает вероятность опасных природных процессов, которые могут инициировать чрезвычайные ситуации на транспорте, сопровождающиеся ущербом жизни и здоровью людей, нанесением вреда окружающей среде, сбоями в транспортной работе и значительным материальным ущербом.

1. Финансирование мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Реализация проанализированного комплекса мер по адаптации не требует дополнительного финансирования из федерального бюджета, в соответствии с [2]. Однако защита транспортной инфраструктуры от климатических рисков может потребовать значительных первоначальных инвестиций, но в долгосрочной перспективе позволит предотвратить рост затрат или дорогостоящее переоснащение. При этом следует соотносить стоимость каждого дополнительного мероприятия по адаптации с ожидаемой величиной полученных выгод. Решения, принятые в рамках финансовой оценки могут пересматриваться и обновляться по мере изменения прогнозируемой вероятности или масштаба опасности, уязвимости инфраструктуры или социально-экономических последствий.

Необходима оценка вариантов, как для ближайшего будущего, так и для долгосрочной перспективы, в противном случае ранние действия могут поставить под угрозу будущие мероприятия, например вследствие сокращения финансирования или невозможности реализации будущих мероприятий на существующих или создаваемых объектах. Например, замена оборудования, вышедшего из строя из-за природных стихийных явлений аналогичным, приведет к быстрому восстановлению функционирования, но может вытеснить экономически эффективное оборудование в долгосрочной перспективе, если вероятность подобных опасных природных явлений возрастет.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Оценка климатических рисков для объектов транспорта

При оценке уровня риска климатических факторов целесообразно оценивать не только процент объектов транспортной инфраструктуры подверженных воздействию, но и ущерб объекту транспортной инфраструктуры, а также вероятность проявления данного климатического риска. Для оценки вероятности возможно использование критериев, приведенных в оценочном докладе МГЭИК: практически определенная вероятность 99–100 %, весьма вероятная 90–100 %, вероятная 66–100 %, скорее всего 33–66 %, маловероятно 0–33 %, очень маловероятно 0–10 %, исключительно маловероятно 0–1 % [3].

Кроме того, климатические изменения, наряду с повышением вероятности природных стихийных явлений, могут сопровождаться опасными природными процессами не характерными для данной территории. Это обуславливает низкую или отсутствующую готовность к реагированию на данное экстремальное явление на данной территории. В этой связи, при оценке вероятности целесообразно пользоваться байесовский метод, учитывающий априорную вероятность при определении апостериорной вероятности реализации климатического риска. Данный подход позволит учесть региональную специфику при выявлении частоты неблагоприятных событий, которая используется при оценке климатических рисков для каждого конкретного объекта транспортной инфраструктуры с учетом сценарной структуры изменения климата.

3. Учет влияния экзогенных геологических процессов на транспортные объекты

В качестве факторов климатических рисков не выделены гравитационные экзогенные геологические процессы, такие как оползни, обвалы, осыпи. При этом увеличение количества и интенсивности осадков в теплое время года приводит к существенному росту вероятности возникновения неблагоприятных последствий, которые связаны с потерей устойчивости склонов. Такие риски значительно возрастают при чередовании засушливых периодов с периодами интенсивных ливневых осадков. На Рис. приведено изменение количества оползней в мире с 1900 года по 2019 год по материалам статистических данных размещенных в базе данных EM-DAT [4].

Как видно из Рис., рост количества оползней в мире с 1900 года по 2019 год описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,96. При этом с 2020 года по 2022 год произошло 48 оползней, что составляет 26 % от количества оползней, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

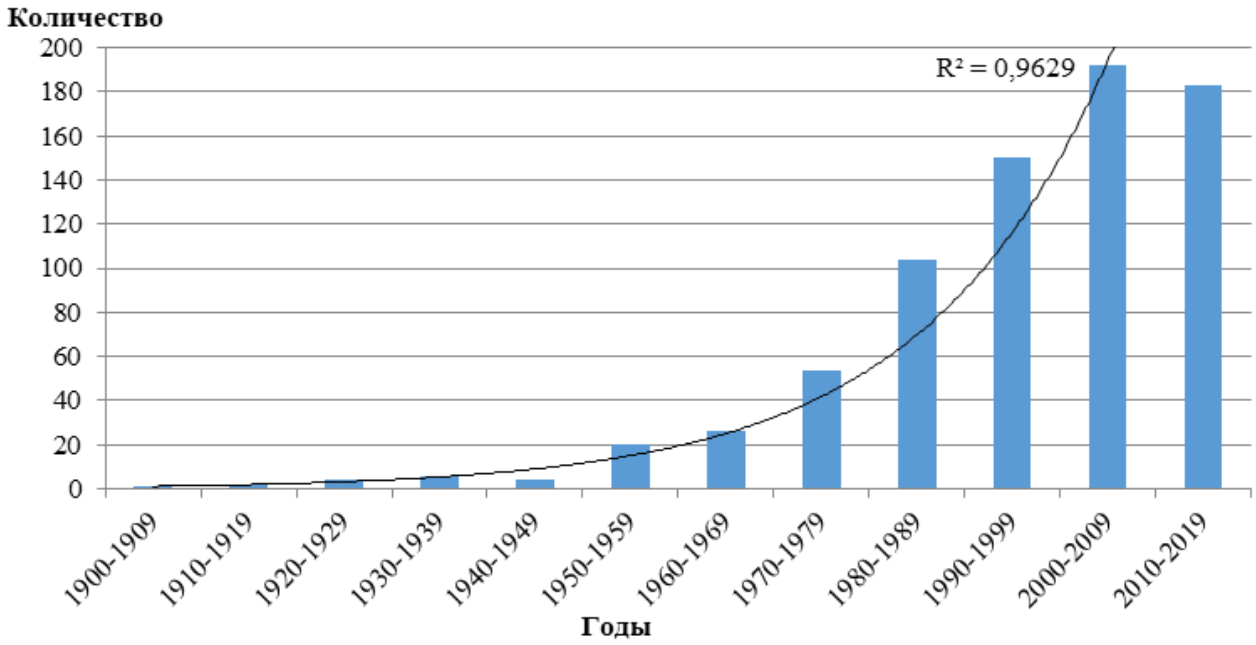


Рис. Изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 год

4. Адаптация к изменениям климата систем связи и автоматики

В перечне приоритетных адаптационных мероприятий не отмечена адаптация систем связи и автоматики, в том числе электронного оборудования, которое испытывает значительные перегрузки при работе в условиях повышенной температуры (например, города усиливают вызванное деятельностью человека потепление на местном уровне). Однако изменение климата повышает вероятность опасных природных процессов, которые могут инициировать техногенные чрезвычайные ситуации.

Большинство железнодорожных объектов показывают повышенную частоту отказов даже при умеренно низких температурах, таких как 20 °C, при этом частота аварий значительно возрастает при превышении температуры 26 °C [5–9]. Эти температуры находятся в пределах климатологических норм температуры, а также в пределах требуемых эксплуатационных характеристик железнодорожной инфраструктуры.

Тепловое расширение также может повлиять на воздушные линии электропередач. При расширении воздушных линий их натяжение уменьшается, что может привести к чрезмерному провисанию. Частота провисания воздушных линий также выше в городских районах из-за эффекта городского острова тепла, который может привести к тому, что городские районы на несколько градусов теплее, чем их окрестности, а дальнейшая урбанизация вместе с более частыми экстремально жаркими периодами увеличат силу волн жары. Города часто являются важными транспортными узлами, и отказ здесь может быть очень проблематичным,

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

быстро распространяясь на остальную часть сети, вызывая значительные задержки в перевозке пассажиров и грузов. Следовательно, понимание природы связанных с жарой происшествий на таких критических участках имеет существенное значение.

Гораздо менее изучено влияние тепла на оборудование СЦБ. В отличие от воздушных линий именно современные виды оборудования СЦБ имеют тенденцию быть более восприимчивыми к сбоям, связанным с нагревом, из-за их повышенной зависимости от электрических и электронных компонентов. Оборудование, находящееся под прямыми солнечными лучами, наиболее уязвимо к перегреву, и, в частности, оборудование внутри контейнеров может испытывать более быстрые изменения температуры и более высокие экстремальные температуры, чем то, которое находится снаружи.

Существуют следующие причины отказов связанных с последствиями климатических изменений для объектов транспортной инфраструктуры.

– большинство происшествий, связанных с жарой, происходит в период с начала до середины лета, а затем снижается, несмотря на то, что температура остается высокой. Это связано с исправлением всех полученных отказов оборудования в наиболее жаркий период и предполагает, что система транспортной инфраструктуры становится все более устойчивой в течение лета, поскольку неисправное оборудование ремонтируется или заменяется. Затенение от искусственных сооружений или деревьев, степень которого может меняться в зависимости от времени суток и времени года, является основной причиной пространственных колебаний отказов вследствие перегрева.

– существует значительная уязвимость оборудования СЦБ к теплу. Кроме того повышается вероятность коробления пути, затрат на ликвидацию аварии связанных с жарой и увеличения числа и продолжительности задержек при перевозке пассажиров и грузов.

– широкий спектр оборудования выходит из строя вследствие нагрева, при температурах окружающей среды, находящихся в пределах рабочего диапазона, а также в пределах климатические нормы данного региона. Причинами отказов может быть использование устаревшего оборудования, процедуры технического обслуживания не всегда могут выполняться при значительных величинах температуры окружающего воздуха.

Существующий подход к обеспечению отказоустойчивости оборудования требует пересмотра в средне и долгосрочной перспективе. Так как без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата случаи отказов оборудования и коробления пути увеличатся в будущем более теплом климате.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Управление тепловыми рисками в критических узлах является обязательным, особенно в городских районах, где эффект острова тепла может привести к значительно более высоким температурам, чем в окружающей местности.

Прогнозируется, что в будущем железнодорожная сеть столкнется с беспрецедентными проблемами из-за более частых высоких температур, и без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата затраты и задержки, связанные с тепловыми рисками, будут увеличиваться. Таким образом, повышение климатической устойчивости транспортной сети в настоящее время имеет существенное значение.

5. Подготовка кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта

Однако климатический кризис формирует перед обществом вызовы, ответ на которые требует комплексного подхода, и включает не только организационные и технические задачи, но и изменение в образовательных подходах.

В п. 16 Национального плана первого этапа адаптации к изменению климата [1] отмечена необходимость включения знаний об изменении климата и адаптации человека и экономики в федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) общего и среднего профессионального образования для просвещения детей и молодежи по вопросам адаптации к изменениям климата.

В настоящее время «применение географических знаний для самостоятельного оценивания уровня безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий: оценивать уровень безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий, в том числе на территории России; оценивать влияние последствий изменений в окружающей среде на различные сферы человеческой деятельности на региональном уровне; сопоставлять, оценивать и аргументировать различные точки зрения по актуальным экологическим и социально-экономическим проблемам мира и России» приведено только во ФГОС среднего общего образования (10–11 класс) [10]. При этом вопросы профессионального обучения, разработки инженерных решений и научное обоснование подходов к адаптации не фигурируют в ФГОС среднего профессионального образования; высшего образования по направлениям подготовки бакалавриата, специалитета, магистров; высшего образования по направлениям подготовки кадров высшей квалификации.

К образованию в области изменения климата следует подходить на институциональном уровне, то есть коллективному переключению внимания на текущую и прогнозируемую климатическую обстановку, с принятием коллективных действий [11].

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

В том числе необходимо принять меры, необходимые для подготовки выпускников высшего образования по профессиям, актуализированным в соответствии с условиями изменяющегося климата (например, образовательные программы: 08.03.01 Строительство; 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника; 20.03.01 Техносферная безопасность; 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 08.05.01 Строительство уникальных зданий сооружений; 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства; 23.05.03 Подвижной состав железных дорог; 23.05.04 Эксплуатация железных дорог; 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов; 23.05.06 Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей). Высшее образование является первой ступенью в профессиональном развитии инженера, однако инженерное образование формирует профессиональные навыки, которые продолжат развиваться на протяжении всей профессиональной деятельности, отвечая на вызовы современного мира.

6. Рассмотрение технологий поглощения парниковых газов как мер по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Наличие связи между программами адаптации и мерами сокращения выбросов парниковых газов позволит расширить возможности реагирования на изменения прогнозов представленных в сценарной структуре [3], а также позволяет управлять факторами климатического риска. В качестве одного из путей адаптации или смягчения последствий изменения климата в плане адаптации в области транспорта может быть рассмотрена разработка и внедрение технологий поглощения выбросов парниковых газов [12–15]. Виды технологий поглощения парниковых газов, которые могут быть внедрены в транспортную отрасль, могут быть отнесены к общим категориям следующим образом:

1. ***Лесоразведение и лесовосстановление*** поглощает углекислый газ в процессе роста лесов. Преимуществом данной технологии является то, что это известная технология, и она может быть реализована с низкими затратами. Однако необходимо учитывать, что для поглощения значительного количества углекислого газа требуются большие площади лесов. При этом существует угроза высвобождения запасенного в древесине углерода при нарушении технологий посадки. Возможны выбросы закиси азота при внесении удобрений для стимулирования роста лесов. Также необходима защита лесов от природных пожаров. В засушливых районах потребность в воде также может быть значимым лимитирующим фактором.

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

2. ***Производство биоэнергии с улавливанием и хранением углерода (BECCS).*** Данная технология заключается в том, что биомасса накапливающая углерод во время роста хранит его в виде органического материала. Данная биомасса может сжигаться на электростанциях (или преобразовываться в другие виды энергии), производя электричество. При этом, углекислый газ образующийся при сжигании улавливается и захоранивается. Биомасса может использоваться для производства водорода, биотоплива или биогаза. Данная технология реализована на демонстрационных моделях, но ее эффективность должна оцениваться в каждом конкретном случае.

3. ***Прямое улавливание CO_2 из окружающего воздуха и хранение (DACCS).*** Значительная часть антропогенных выбросов парниковых газов происходит из распределенных источников. Зачастую улавливание данных выбросов в источнике е является эффективным и нецелесообразным. Для удаления данных выбросов можно производить улавливание углекислого газа непосредственно из окружающего воздуха. Реализация технологии прямого улавливания из атмосферы требует источник энергии и/или тепла с минимальным углеродным следом, что накладывает ограничение на выбор подходящего места расположения территориями, где есть доступ к такому источнику. При прямом улавливании используется сорбент для поглощения углекислого газа в твердой или жидкой фазе. После поглощения углекислого газа, сорбент регенерируется с выделением высококонцентрированного углекислого газа с его дальнейшей транспортировкой и захоронением. Например, в подземных пустотах, из которых идет добыча углеводородов, с последующим закачиванием в горные породы.

Так как ***улавливание и хранение углерода (CCS)*** выступает в качестве компонента в категориях 2 и 3, приведенных выше, а также является технологией прямого смягчения воздействия со стороны точечных источников выброса углекислого газа, данная технология может рассматриваться как отдельная технология отрицательных выбросов [12].

7. Инклюзивность при разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Цель адаптации к изменению климата состоит в том, чтобы путем расстановки акцентов на конкретных мероприятиях для конкретных объектов транспортной инфраструктуры установить количественные параметры, в том числе временные, в которых они должны быть реализованы, с учетом приоритетных климатических рисков.

Взаимодействие с заинтересованными сторонами (владельцы инфраструктуры, смежные организации, органы исполнительной власти и местного самоуправления) здесь имеет решающее значение, поскольку

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

объекты инфраструктуры являются частью взаимозависимой системы, при этом отказ смежной сети инфраструктуры (например, электроснабжения) связанный с погодными условиями может повлиять на транспортную инфраструктуру. Внешние заинтересованные стороны также могут предоставить информацию об уязвимости управляемых ими объектов при реализации климатических рисков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка показала, что в ряде случаев негативным фактором влияния при оценке климатического риска может служить не сам опасный природный процесс, а инициируемое им природное или техногенное явление, которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной объект транспортной инфраструктуры. Анализируя факторы климатического риска, необходимо определить все возможные объекты воздействия риска (объект, находящийся под воздействием опасного явления, неблагоприятных условий погоды, аномальных климатических условий). При этом увеличение ущерба определяется не только факторами климатического риска, но и уязвимостью объектов транспортной инфраструктуры. Уязвимость определяется как значительной степенью износа объектов, так и имеющимися отклонениями от строительных норм и правил. Кроме того уязвимость ярко проявляется у объектов, расположенных на территориях находящихся в зоне повышенного климатического риска.

Учет предложений по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта позволит обеспечить необходимое финансирование мероприятий по адаптации, провести оценку климатических рисков для объектов транспорта с учетом априорной вероятности неблагоприятных событий, учесть растущее влияние экзогенных геологических процессов на транспортные объекты, акцентировать внимание на уязвимости к изменениям климата систем связи и автоматики на транспорте, обеспечить необходимый уровень профессиональной подготовки кадров для реализации плана адаптации, включить технологии поглощения парниковых газов в деятельность отрасли и обеспечить участие в разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта всех заинтересованных сторон.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года. [Nacional'nyj plan meropriyatij pervogo etapa adaptacii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf Ссылка активна на 20.03.2023.
2. План адаптации к изменениям климата в области транспорта. [Plan adaptacii k izmeneniyam klimata v oblasti transporta [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: https://mintrans.gov.ru/documents/9/11749?type=
3. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor M, et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press.* 2023;3056 doi:10.1017/9781009325844
4. Emergency Events Database. [Emergency Events Database [Internet]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: http://www.emdat.be
5. Ferranti E, Chapman L, Lowe C, et al. Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather Clim. Soc.* 2016;8:177-191. doi: 10.1175/wcas-d-15-0068.1
6. Ferranti E, Chapman L, Lee S, et al. The hottest July day on the railway network: Insights and thoughts for the future. *Meteorol. Appl.* 2017;25:195-208. doi: 10.1002/met.1681
7. Chapman L, Huan X, Sanderson V, White S. Modelling of rail surface temperatures: A preliminary study. *Theor.Appl.Climatol*. 2008;92:121-131. doi: 10.1007/s00704-007-0313-5
8. Dobney K, Baker C, Quinn A, Chapman L. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. *Meteor. Appl*. 2009;16:245-251. doi: 10.1002/met.114
9. Dobney K, Chapman L, Quinn A. The future cost to the United Kingdom's railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change. *Proc. Inst. Mech. Eng*. 2010;224:25-34. doi: 10.1243/09544097JRRT292
10. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования. [Federal'nyj gosudarstvennyj obrazovatel'nyj standart srednego obshchego obrazovaniya [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: https://base.garant.ru/70188902/8ef641d3b80ff01d34be16ce9bafc6e0/
11. Axelithioti P, Fisher RS, Ferranti EJS, et al. What Are We Teaching Engineers about Climate Change? Presenting the MACC Evaluation of Climate Change Education. *Educ. Sci.* 2023;13:153. doi: 10.3390/educsci13020153
12. Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Реализация подходов к сокращению выбросов парниковых газов в железнодорожной отрасли // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 2 (266). – С. 20–25. [Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Implementation of approaches to reduce greenhouse gas emissions in the railway industry. *Life safety*. 2023;2(266):20-25. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 20.03.2023. Доступно по: https://foto.tgpi.ru/lib/2023/podpis/02/bzhd2.pdf
13. Titova T, Akhtyamov R, Nasyrova E, Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;49:473-478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1_49
14. Nasyrova E, Elizaryev A, Aksenov S, et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences.* 2019;110:02045. doi: 10.1051/e3sconf/201911002045

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

15. Ershova S, Orlovskaya T, Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018;463(4):042040. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042040

Сведения об авторах:
Титова Тамила Семеновна, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 1558-5811; ORCID: 0000-0002-9328-0835
E-mail: titova@pgups.ru

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0002-3664-1147;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Мещерякова Наталья Артемовна, магистрант;
eLibrary SPIN: 2501-4268; ORCID: 0000-0001-8732-219X
E-mail: stella_2000@inbox.ru

Information about the authors:
Tamila Titova, Doctor of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 1558-5811; ORCID: 0000-0002-9328-0835
E-mail: titova@pgups.ru

Rasul Akhtyamov, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0002-3664-1147;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Natalia Mescheriakova, Student;
eLibrary SPIN: 2501-4268; ORCID: 0000-0001-8732-219X
E-mail: stella_2000@inbox.ru

Цитировать:
Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Пути совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18

To cite this article:
Titova TS, Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):5-18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК 629.046, 629.067
DOI 10.17816/transsyst20239219-32

© А.С. Ватаев[1], О.А. Дедова[2], В.В. Никитин[1]
[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)
[2]Рязанский филиал Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
(Рязань, Россия)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Обоснование: Магнитолевитационный транспорт с комбинированными системами тяги, подвеса и направления на основе сверхпроводящих катушек (СПК) позволяет достигать скорости движения до 500-600 км/ч при весьма существенном (до 150–200 мм) воздушном зазоре, что является важным фактором обеспечения безопасности высокоскоростных перевозок. Однако СПК являются источником сильных внешних магнитных полей, которые в условиях ограниченных габаритов экипажа могут оказывать вредное влияние как на пассажиров, так и на бортовое вспомогательное оборудование.

Цель: анализ внешних магнитных полей СПК систем тяги, подвеса и направления магнитолевитационных экипажей и эффективности ферромагнитных экранов как средства обеспечения электромагнитной безопасности пассажиров и электромагнитной совместимости СПК с прочим бортовым оборудованием.

Материалы и методы: для достижения поставленной цели использованы методы аналитического и численного моделирования магнитных полей СПК с применением современных программных пакетов. В качестве прототипа комбинированной магнитной системы тяги, подвеса и направления принята система магнитолевитационного экипажа MLX-L0, проходящего опытно-коммерческую эксплуатацию на полигоне Яманаши (Япония).

Результаты: показано, что величина внешних магнитных полей СПК систем тяги подвеса и направления в пассажирском салоне экипажа-прототипа превышает предельно допустимые уровни, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами, как без экранирования, так и при пассивном экранировании плоскими стальными листами.

Заключение: пассивное экранирование СПК стальными листами, в том числе многослойными, при заданных габаритах экипажа не обеспечивает требуемого снижения уровня внешних магнитных полей.

Ключевые слова: сверхпроводящая катушка, магнитолевитационный транспорт, ферромагнитный экран, электромагнитная совместимость.

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© A.S. Vataev[1], O.A. Dedova[2], V.V. Nikitin[1]
[1]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)
[2]Ryazan Branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(Ryazan, Russia)

EFFICIENCY OF FERROMAGNETIC SHIELDING OF SUPERCONDUCTING COILS OF HIGH-SPEED MAGLEV CREW

Background: Magnetic levitation transport with combined traction, suspension and guidance systems based on superconducting coils (SCC) allows reaching speeds of up to 500–600 km/h with a very significant (up to 150–200 mm) air gap, which is an important factor in ensuring the safety of high-speed transportation. However, SCC are a source of strong external magnetic fields, which, in conditions of limited crew dimensions, can have a harmful effect on both passengers and on-board auxiliary equipment.

Aim: to analyze the external magnetic fields of the SCC systems for traction, suspension and direction of maglev vehicles and the effectiveness of ferromagnetic screens as a means of ensuring the electromagnetic safety of passengers and the electromagnetic compatibility of the SCC with other onboard equipment.

Materials and methods: to achieve this goal, methods of analytical and numerical modeling of the magnetic fields of the SCC using modern software packages were used. As a prototype of the combined magnetic system of traction, suspension and direction, the system of the MLX-L0 maglev vehicle, which is undergoing pilot commercial operation at the Yamanashi test line (Japan), was adopted.

Results: it is shown that the value of the external magnetic fields of the SCC of the traction and guiding systems in the passenger cabin of the prototype crew exceeds the maximum permissible levels established by domestic and foreign regulatory documents, both without shielding and with passive shielding with flat steel sheets.

Conclusion: passive shielding of the SCC with steel sheets, including multilayer ones, does not provide the required reduction in the level of external magnetic fields for a given vehicle dimensions.

Key words: superconducting coil, maglev transport, ferromagnetic shield, electromagnetic compatibility.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные системы с экипажами на электродинамическом подвесе и синхронным тяговым приводом позволяют обеспечивать скорости движения до 500–600 км/ч при зазоре в системе подвеса порядка 150–200 мм. Такое значение зазора с одной стороны является фактором, повышающим устойчивость транспортной системы к неблагоприятным

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

погодным условиям, в частности, снежным заносам, и повышающим безопасность движения, а с другой стороны требует применения на экипаже сверхпроводящих катушек (СПК) с большими намагничивающими силами, способных создавать достаточно сильные магнитные поля, чтобы обеспечивать электромагнитное взаимодействие с путевыми катушками систем тяги и подвеса. Сильные внешние магнитные поля, рассеиваемые бортовыми СПК в окружающем пространстве, определяют важность проблемы их электромагнитной совместимости с прочим бортовым силовым и информационным электрооборудованием и электромагнитной безопасности пассажиров в салоне экипажа.

В настоящее время на полигоне протяженностью 42,8 км в префектуре Яманаши, Япония (*Yamanashi Maglev Test Line*), в опытно-коммерческой эксплуатации находятся высокоскоростные экипажи *L*0 компании *JR-Central*, оборудованные комбинированной системой синхронной тяги, электродинамического подвеса и направления на основе бортовых СПК, разработанной под руководством *Railway Technical Research Institute* (*RTRI*). В марте 2015 года семивагонный состав из экипажей, спроектированных на крейсерскую скорость 550 км/ч, установил рекорд скорости – 603 км/ч [1]. Планируется, что данный опытный участок станет частью высокоскоростной магистрали *Chuo Shinkansen*, которая к 2027 году должна связать города Токио и Нагоя. Существуют проекты магнитолевитационного транспорта, в которых движение экипажа предполагается осуществлять в среде технического вакуума; в таких системах можно достичь скоростей движения до 1000 км/ч [2–5].

При освоении технологии массового производства высокотемпературных сверхпроводников и снижении их рыночной стоимости магнитолевитационные транспортные системы с электродинамическим подвесом и линейным тяговым приводом на основе СПК могут стать конкурентоспособными по сравнению с другими видами транспорта и найти применение для перевозок пассажиров и грузов на расстояния до 500–1000 км [6].

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА И НАПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭКИПАЖЕЙ

В настоящее время в транспортных системах, обеспечивающих перевозки со скоростями до 450-500 км/ч, нашли применение линейные синхронные двигатели (ЛСД) с длинным статором (трехфазной обмоткой, размещаемой на путевом полотне) и коротким индуктором, размещаемом на экипаже. В системе *Transrapid* используются ЛСД с возбуждением от

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

обычных электромагнитов; в системе *MLU-MLX-L*0 – ЛСД с возбуждением от сверхпроводящих магнитов (СПК) [7].

СПК, применяемые в системах тяги, подвеса и направления, обеспечивают сравнительно высокие значения магнитной индукции, что позволяет создавать транспортные системы с относительно большим значением левитационного зазора и отсутствием массивных ферромагнитных элементов. Для упрощения конструкции магнитной системы и криогенного обеспечения признано целесообразным создавать комбинированные системы тяги, подвеса и направления, т.е. одновременно использовать магнитное поле СПК для создания тягового усилия, сил левитации и боковой стабилизации. Из множества возможных вариантов конструктивного исполнения совмещенных систем тяги, подвеса и направления до полномасштабного исполнения и ввода в эксплуатацию доведена система с вертикальным расположением катушек [8–10].

В настоящее время в опытно-коммерческой эксплуатации на полигоне в префектуре Яманаши (Япония) находятся высокоскоростные экипажи серии *L*0 с комбинированной системой синхронной тяги, электродинамического подвеса и направления (Рис. 1). На путевом полотне размещаются трехфазные катушки статора линейного синхронного двигателя, создающие бегущее магнитное поле, а также 8-образные катушки левитации и боковой стабилизации. На экипаже размещаются сверхпроводящие катушки, которые являются источником магнитного поля как для системы тяги, так и для системы подвеса и боковой стабилизации. Кроме этого, на экипаже размещаются катушки линейного генератора, который питает бортовые потребители энергии: систему охлаждения сверхпроводящих магнитов, систему кондиционирования, освещения и т.п.

Таблица 1. Технические данные сверхпроводящей катушки системы тяги, подвеса и направления [8, 9].

Параметр	**Величина**
Полюсное деление, мм	1350
Длина катушки, мм	1070
Высота катушки, мм	500
Намагничивающая сила, кА	700
Поперечное расстояние между катушками, мм	2980

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

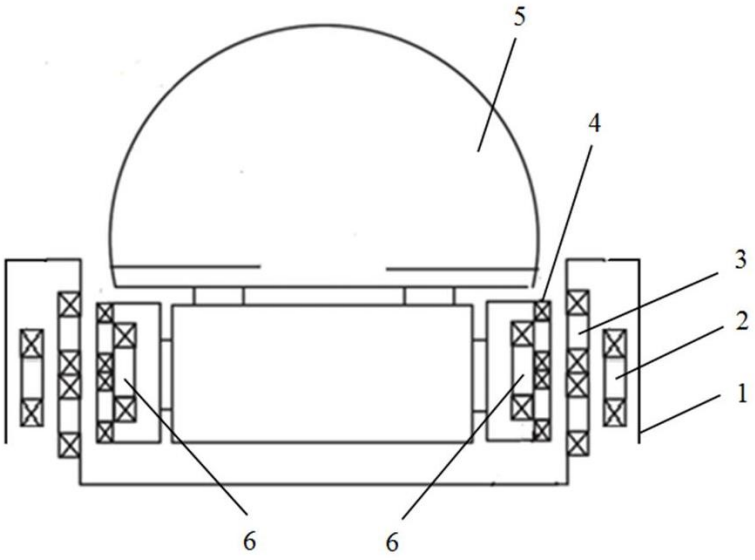


Рис. 1. Схематичный разрез магнитной системы:
1 – путевое полотно;
2 – путевая катушка линейного синхронного двигателя;
3 – путевые катушки системы левитации и боковой стабилизации;
4 – бортовые катушки линейного генератора;
5 – экипаж;
6 – бортовые сверхпроводящие катушки

Основным источником внешних магнитных полей, воздействующих на пассажиров и внутрибортовое оборудование экипажа, являются СПК, намагничивающая сила которых на несколько порядков превышает намагничивающую силу остальных катушек системы. По этой причине на начальном этапе анализа в качестве источника поля будут учитываться только СПК. Магнитная система экипажа, представленная на Рис. 1, принята в качестве прототипа для исследования внешних магнитных полей; на ее основе составлена расчетная схема, приведенная на Рис. 2. СПК имеют трековую форму; в прямоугольной декартовой системе координат (X, Y, Z) рассматривается поперечное сечение катушек вертикальной плоскостью и создаваемое ими плоскопараллельное магнитное поле, позволяющее рассматривать задачу расчета в двухмерной постановке. Направление координатных осей Y, Z показано на рисунке, ось X направлена перпендикулярно плоскости рисунка (вдоль направления движения экипажа).

В расчетной схеме приняты следующие размеры:
$2Z_0 = 2980$ мм;
$2Y_0 = 500$ мм;
$Z_S = 100$ мм;
$Y_S = 100$ мм;
$Y_Q = 600$ мм.
Намагничивающая сила СПК $wI = 700$ кА.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

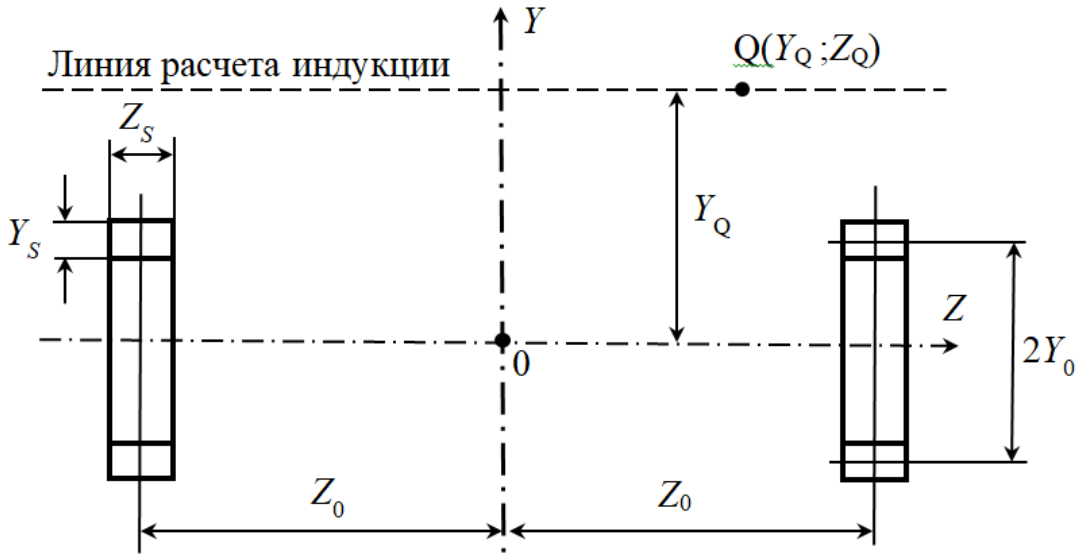


Рис. 2. Расчетная схема магнитной системы СПК

ВНЕШНИЕ ПОЛЯ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК В ОДНОРОДНОЙ НЕМАГНИТНОЙ СРЕДЕ

Внешнее магнитное поле экипажных СПК в немагнитной однородной среде (в отсутствие ферромагнитных экранов) может быть рассчитано на основании принципа суперпозиции как поле совокупности тонких токовых нитей, которыми может быть представлено каждое из поперечных сечений, или как поле совокупности шин прямоугольного сечения [11–13].

Наиболее простые инженерные соотношения получаются при представлении поперечного сечения СПК в виде совокупности тонких токовых нитей. В этом случае компоненты вектора магнитной индукции в расчетной точке Q определяются выражениями:

$$B_Z = \frac{\mu_0}{2\pi}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}(wI)_{ij}\frac{Y_Q - Y_{ij}}{\left(Z_Q - Z_{ij}\right)^2 + \left(Y_Q - Y_{ij}\right)^2};$$

$$B_Y = -\frac{\mu_0}{2\pi}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}(wI)_{ij}\frac{Z_Q - Z_{ij}}{\left(Z_Q - Z_{ij}\right)^2 + \left(Y_Q - Y_{ij}\right)^2},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

Y_Q, Z_Q – координаты расчетной точки Q;

Y_{ij}, Z_{ij} – координаты эквивалентной токовой нити;

$(wI)_{ij}$ – полный ток эквивалентной нити;

M, N – число эквивалентных токовых нитей по осям Y и Z соответственно.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

При разбиении поперечного сечения СПК на совокупность токовых нитей следует стремиться к тому, чтобы отношение M/N приближалось к отношению соответствующих сторон поперечного сечения катушки. При расчете индукции на существенном удалении от источников поля достаточную точность можно получить уже при величинах MN=1; 2 или 4.

На Рис. 3 представлено распределение модуля индукции магнитного поля вдоль оси Z при различных значениях координат Y_Q расчетных точек.

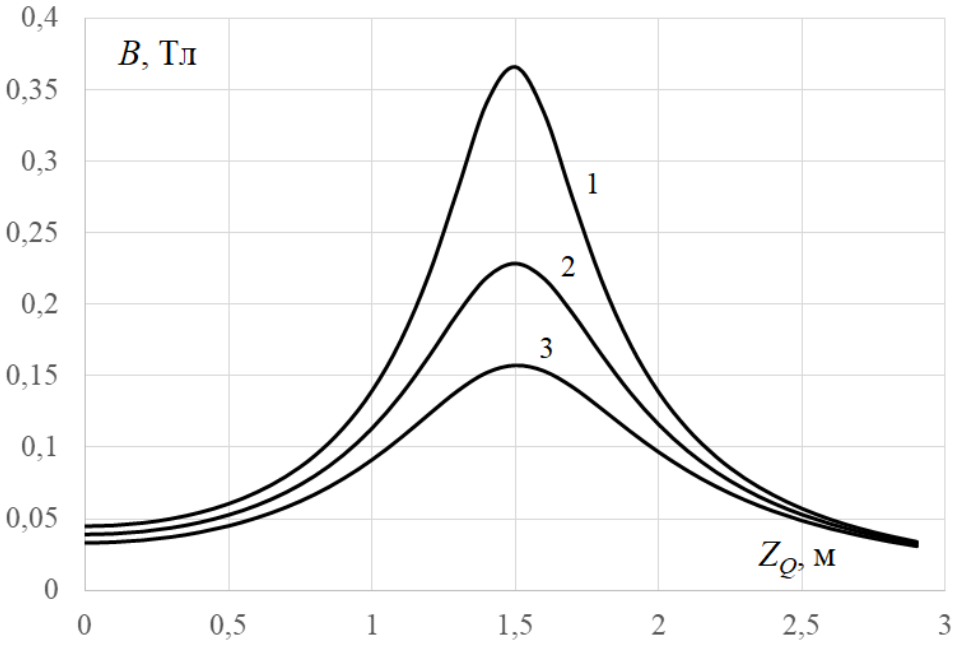


Рис. 3. Распределение модуля магнитной индукции внешнего поля СПК по координате Z_Q при различных значениях Y_Q: 1 – Y_Q=0,5 м; 2 – Y_Q=0,6 м; 3 – Y_Q=0,7 м

Уровню пола пассажирского салона соответствует диапазон значений Y_Q= 0,55…0,6 м; половине ширины пассажирского салона – диапазон значений Z_Q= 0…1,45 м. Расчеты показывают, что на уровне пола пассажирского салона индукция внешнего магнитного поля СПК без учета ферромагнитных экранов составляет B = 30…225 мТл, что существенно превышает предельно допустимый уровень, установленный отечественными и зарубежными нормативными документами. Данное обстоятельство определяет необходимость защиты пассажиров и оборудования от внешних полей СПК.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК С УЧЕТОМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

Защиту внутреннего, весьма ограниченного, пространства экипажа, в котором размещаются пассажиры и оборудование, от внешних магнитных полей СПК системы тяги, подвеса и направления можно осуществлять с

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

помощью пассивных и активных экранов. В первом случае ослабление магнитного поля в экранируемой области достигается за счет физических свойств экранирующей оболочки: высокой магнитной проницаемости стали или диамагнитных свойств сверхпроводникового материала экрана. Принцип активного экранирования основан на создании в заданной области пространства вторичного экранирующего магнитного поля с помощью катушек, обтекаемых током, или постоянных магнитов. При этом вторичное поле направлено встречно полю СПК и частично или полностью его ослабляет [14, 15].

В настоящей статье рассмотрено экранирующее действие пассивных ферромагнитных экранов, как наиболее простого, дешевого и технологичного способа обеспечения защиты пассажиров и оборудования внутри экипажа. Рассматриваются экраны следующих форм: плоский однослойный (в виде стального листа), плоский двухслойный, полуцилиндрический и экран в форме сегмента цилиндра (Рис. 4). Для всех вариантов исполнения толщина ферромагнитного экрана принята 10 мм; расчет магнитного поля ведется в одних и тех же точках экранируемой области пространства на расстоянии Y_Q=600 мм от начала координат (см. Рис. 2).

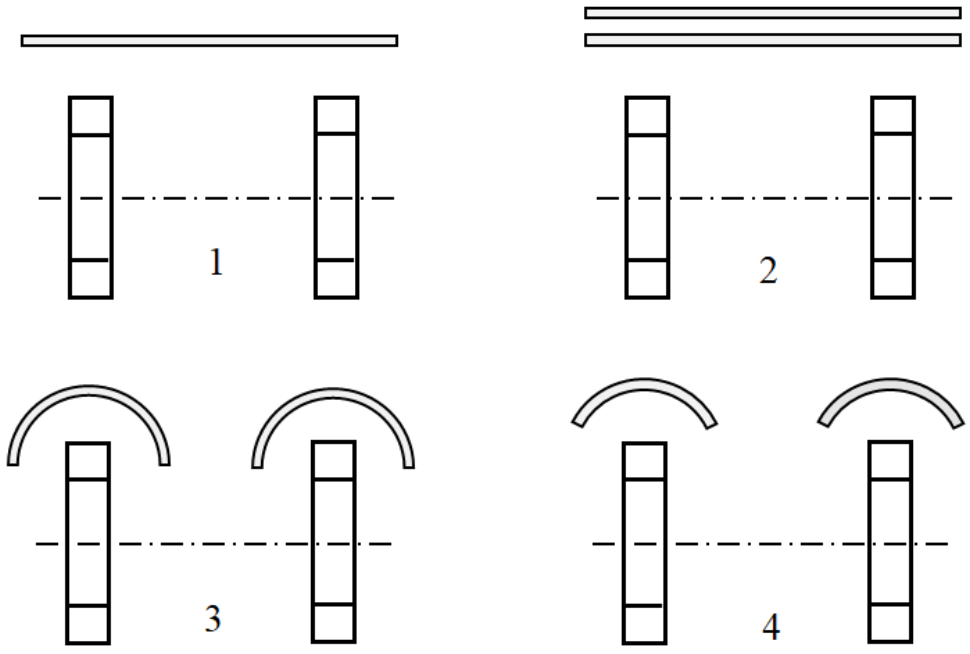


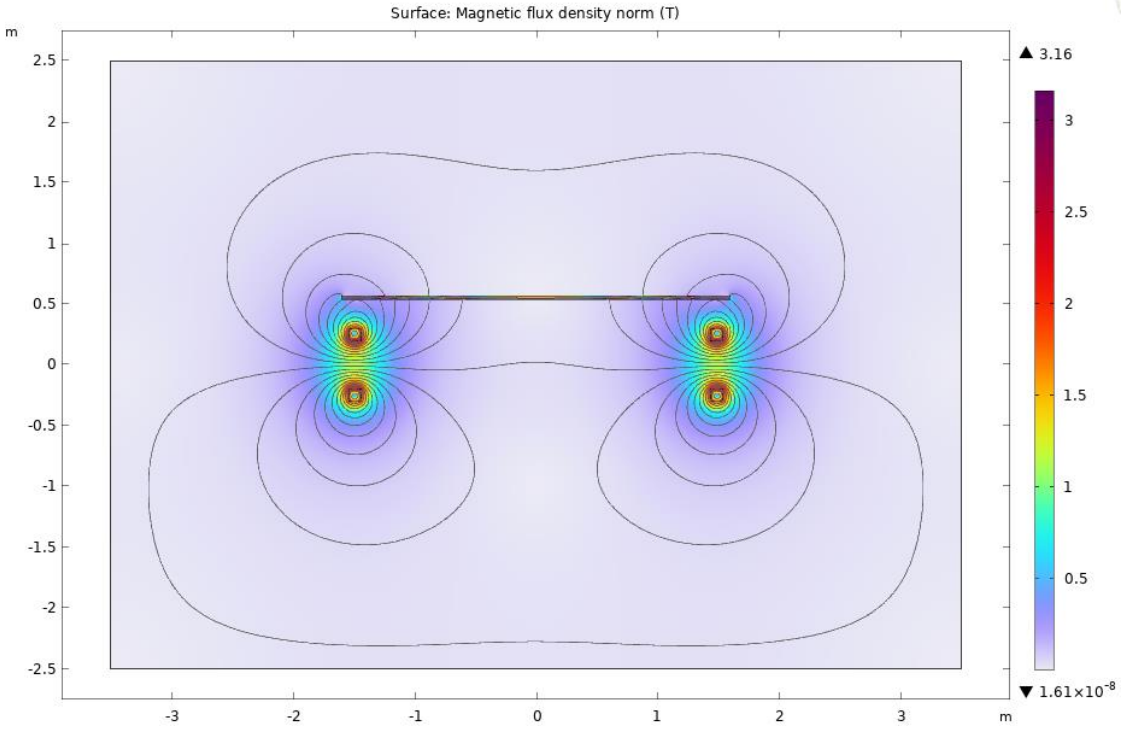
Рис. 4. Формы ферромагнитных экранов:
1 – плоский;
2 – плоский двухслойный;
3 – полуцилиндрический;
4 – сегмент цилиндра

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

Характеристика намагничивания стали представляет собой нелинейную зависимость $B(H)$, поэтому расчет магнитного поля в области за ферромагнитным экраном необходимо вести с использованием программных пакетов расчета магнитных полей в неоднородных средах.

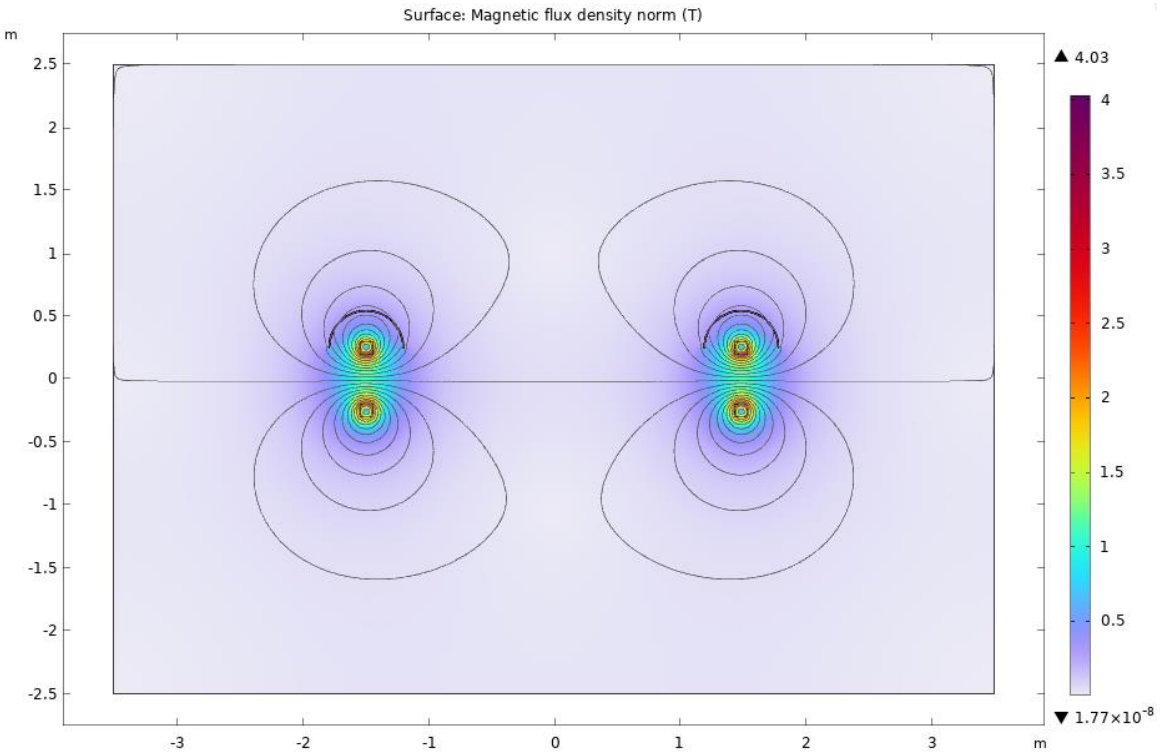
Эффективность экранирования обычно оценивается по величине коэффициента экранирования, который представляет собой отношение магнитной индукции в заданной точке экранируемого пространства без учета магнитного экрана к магнитной индукции в той же точке с учетом защитного действия экрана. Недостатком такого способа является то, что эта оценка – локальная, отнесенная к конкретной точке пространства. Другим способом, который позволяет дать общую оценку свойств экранирующей конструкции во всем заданном объеме, является коэффициент экранирования, определяемый как отношение энергий магнитного поля в объеме без учета экранирующей оболочки и с учетом ее защитного действия [11, 15].

На Рис. 5 представлена пространственная картина распределения магнитного поля для плоского двухслойного, полуцилиндрического экранов и экрана в форме сегмента цилиндра. На Рис. 6 даны кривые распределения модуля магнитной индукции вдоль горизонтальной линии с координатой $Y_Q = 600$ мм, соответствующей уровню пола пассажирского салона.

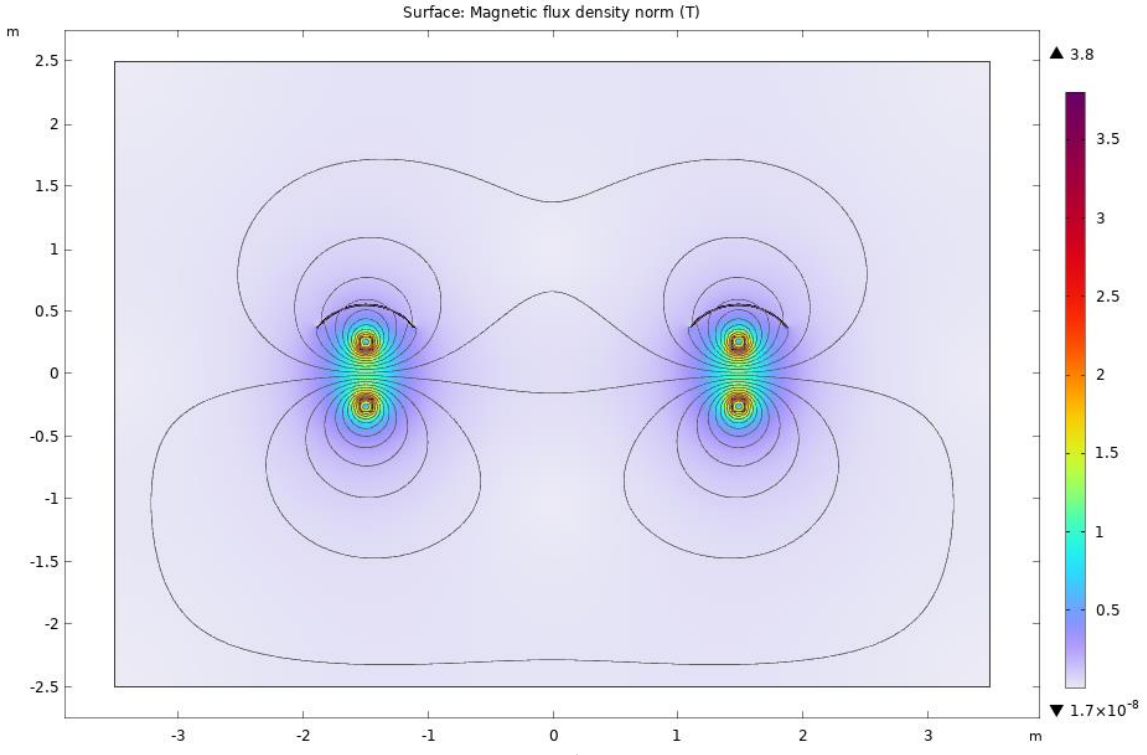


а)

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023



б)



в)

Рис. 5. Картина распределения магнитного поля в пространстве с учетом нелинейных свойств ферромагнитных экранов: плоского двухслойного (а), полуцилиндрического (б) и в форме сегмента цилиндра (в)

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

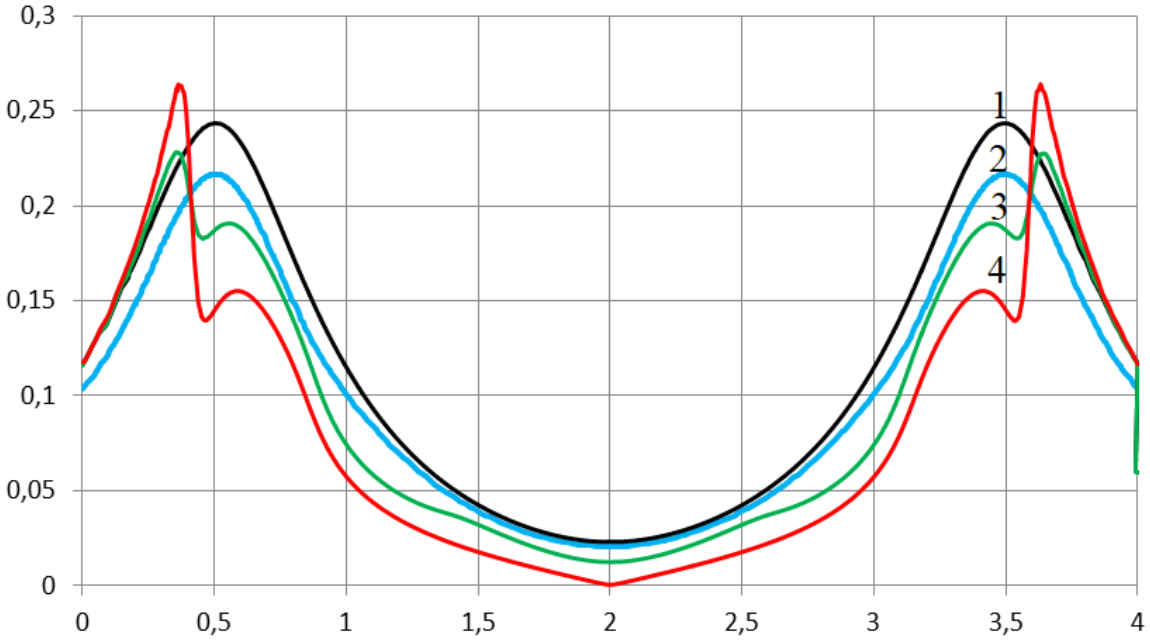


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля по координате Y_Q = 600 мм:
1 – без экранов и с учетом полуцилиндрического экрана;
2 – с экраном в форме сегмента цилиндра;
3 – с плоским однослойным экраном;
4 – с плоским двухслойным экраном

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают, что в отсутствие экранов внешние магнитные поля СПК системы тяги, подвеса и направления в зоне размещения пассажиров и бортового электрооборудования весьма существенны и на уровне пола пассажирского салона вблизи боковой стенки достигают значения 0,245 Тл.

Экранирование внешнего поля СПК с помощью ферромагнитных оболочек в форме полуцилиндра не дает уменьшения индукции в контрольных точках. Наиболее эффективным будет двухслойный ферромагнитный экран, который обеспечит снижение индукции в 1,6…1,7 раза. Однако такой уровень индукции магнитного поля в экранируемой области (до 0,15 Тл) также превышает предельно допустимые уровни, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами. Дальнейшего снижения уровня магнитного поля в заданной области можно добиться применением плоских трехслойных ферромагнитных экранов, однако при этом возрастет масса экипажа и необходимая намагничивающая сила СПК системы тяги и подвеса, а значит и индукция внешнего магнитного поля.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

Данное обстоятельство свидетельствует о недостаточной эффективности пассивного ферромагнитного экранирования как средства обеспечения электромагнитной безопасности пассажиров и электромагнитной совместимости СПК и бортового вспомогательного оборудования высокоскоростных экипажей.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Japan's maglev train breaks world speed record with 600 km/h test run. *The Guardian.* United Kingdom: Guardian News and Media Limited. 21 April 2015. Retrieved 21 April 2015. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://www.theguardian.com/world/2015/apr/21/japans-maglev-train-notches-up-new-world-speed-record-in-test-run
2. Hyung WL, Kim KC. Review of Maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics* 2006;42(7):1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
3. Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022, – Т. 8. – № 4 – С. 91–106. [Kim KK, Karpova IM. On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):91-106. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228491-106
4. Ким К.И., Ким К.К., Вешкин В.В. Магнитное поле и силы в гибридной системе левитации высокоскоростного транспорта // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 44–50. [Kim KI, Kim KK, Vechkin VV. Magnetic Field and Forces in a Hybrid Levitation System for a HighSpeed Vehicle. *Jelektrichestvo*. 2021;6:44-50. (In Russ.)]. doi: 10.24160/0013-5380-2021-6-44-50
5. Антонов Ю.Ф., Ли В. Сверхзвуковой наземный транспорт в разреженной среде ограниченного пространства: прорывное или тупиковое направление // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 35–46. [Antonov YF, Li W. Supersonic land transport in the disturbed environment of the limited space: breakthrough or direct direction. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):35-46. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20173135-46
6. Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – №4. – С. 115–123. [Antonov YF. Levitation and Lateral Stabilization Device Based on a Second-Generation High-Temperature Superconductor. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):115-123. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201954115-123
7. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [ZaitsevAA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://avidreaders.ru/read-book/magnitolevitacionnaya-transportnaya-tehnologiya.html Ссылка активна на: 05.03.2023.

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

8. Boldea I. *Linear Electric Machines, Drives and MAGLEV's Handbook*. CRC Press; 2013. 635 p. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/260711644_Linear_Electric_Machines_Drives_and_MAGLEVs_Handbook_Boldea_I_2013_Book_News
9. Han H-S, Kim DS. *Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications*. Springer; 2016. 246 p. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-7524-3
10. Kim K.K., Khismatulin M.I., Anisimov G.N. Problem of increasing the efficiency of high-speed transport system with magnetic suspension of vehicle and propulsion linear superconductive synchronous motor // Транспортда ресурс тежамкор технологиялар мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий – техника анжумани илмий: Научные труды республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых, Ташкент, 18–19 декабря 2021 года / Министерство транспорта Республики Узбекистан Ташкентский государственный транспортный университет. – Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2021. – С. 130–135. [Kim KK, Khismatulin MI, Anisimov GN. Problem of Increasing the Efficiency of High-Speed Transport System with Magnetic Suspension of Vehicle and Propulsion Linear Superconductive Synchronous Motor. In: Resursosberegajushhie tehnologii na transporte. Nauchnye trudy respublikanskoj nauchno – tehnicheskoj konferencii s uchastiem zarubezhnyh uchenyh. Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet. Transportda resurs tezhamkor tehnologijalar mavzusidagi horizhij olimlar ishtirokidagi respublika ilmij – tehnika anzhumani ilmij : Nauchnye trudy respublikanskoj nauchno – tehnicheskoj konferencii s uchastiem zarubezhnyh uchenyh, Tashkent, 18–19 dekabrja 2021 goda / Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet. Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universite; 2021:130-135. (In Russ.)].
11. Аполонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей: монография / под ред. А.Н. Горского. – Москва: Маршрут, 2006. – 986 с. [Apolonskij SM, Gorskij AN. *Raschety jelektromagnitnyh polej*: monograf. Gorskij AN. editor. Moskva: Marshrut; 2006. 986 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01003178933
12. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970. – 376 с. [Binns K, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic field problems*. Moscow: Jenergija; 1970. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://djvu.online/file/UdvfzQUCysVpi
13. Штафль М. Электродинамические задачи в электрических машинах и трансформаторах / Пер. с чеш. В.И. Васина. – М.;Л.: Энергия, 1966. – 200 с. [Shtafl' M. *Jelektrodinamicheskie zadachi v jelektricheskih mashinah i transformatorah*. Per. s chesh. VI. Vasina. Moscow; Leningrad: Jenergija, 1966. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01006495988
14. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 198 с. [Turovskij Ja. *Jelektromagnitnye raschety jelementov jelektricheskih mashin*. Moscow: Jenergoatomizdat; 1986. (In Russ)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: http://zodchii.ws/books/info-472.html
15. Аполлонский С.М., Горский А.Н., Никитин В.В. Проблемы электромагнитной без опасности в современных электроэнергетических системах железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 2. – С. 43–47. [Apollonskij SM, Gorskij AN, Nikitin VV. Problems of electromagnetic safety in modern electric power rail system. *Jelektronika i jelektrooborudovanie*

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

transporta. 2017;2:43-47. (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/yktzsx Ссылка активна на: 07.05.2023.

Сведения об авторах:
Ватаев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2832-4481; ORCID: 0000-0002-9285-709X;
E-mail: avataev@yandex.ru

Дедова Ольга Андреевна;
eLibrary SPIN: 9447-2830; ORCID: 0009-0001-7403-8154;
E-mail: dedova@pgups.ru

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;
E-mail: pgups.emks@mail.ru

Information about the authors:
Andrew S. Vataev, Cand. Sci. (Tech.), associate professor;
eLibrary SPIN: 2832-4481; ORCID: 0000-0002-9285-709X;
E-mail: avataev@yandex.ru

Olga A. Dedova;
eLibrary SPIN: 9447-2830; ORCID: 0009-0001-7403-8154;
E-mail: dedova@pgups.ru

Victor V. Nikitin, Dr. Sci. (Tech.), professor;
eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;
E-mail: pgups.emks@mail.ru

Цитировать:
Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 19–32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

To cite this article:
Vataev AS, Dedova OA, Nikitin VV. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):19-32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333.41
DOI 10.17816/transsyst20239233-43

© Кузнецов А.А.[1], Изварин М.Ю.[2]
[1]Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Обоснование: Повышение эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе возможно при создании системы использования энергии рекуперации для отопления вагонов пассажирских поездов.

Цель: создание системы, позволяющей использовать энергию вырабатываемую электровозом постоянного тока при рекуперативном торможении и отсутствии потребителя в тяговой сети с целью отопления пассажирских вагонов.

Материалы и Методы: анализ статистических данных и публикаций по использованию рекуперативного торможения, анализ известных схемотехнических решений в области систем отопления пассажирских вагонов.

Результаты работы: разработаны принципы построения системы, повышающей эффективность рекуперации с преобразованием электрической энергии в тепловую и возможности ее накопления.

Заключение: Создание и внедрение описанной системы позволит повысить эффективность рекуперативного торможения и общую энергоэффективность перевозочного процесса на электрифицированных участках постоянного тока.

Ключевые слова: Электрический подвижной состав, рекуперативное торможение, высоковольтная подвагонная магистраль, комбинированное отопление.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Kuznetsov[1], M.Yu. Izvarin[2]
[1] Omsk State Transport University
(Omsk, Russia)
[2]Emperor Alexander I Petersburg Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

USE OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY IN THE PASSENGER COACHES HEATING SYSTEM

Background: Increasing the efficiency of regenerative braking on sections of railways electrified at direct current is possible when creating a system for using recuperation energy for heating passenger coaches.

Aim: development of a system that allows using the regenerative braking energy under conditions absence of a consumer in the traction network for the purpose of heating passenger coaches.

Materials and Methods: analysis of the statistical data and publications on the use of regenerative braking, analysis of known circuit solutions in the area of passenger coaches heating systems.

Results: the principles of constructing a system that increases the efficiency of regenerative braking was developed.

Conclusion: The creation and implementation of the system for the use of regenerative braking energywill improve the efficiency of regenerative braking and the overall energy efficiency of the transportation process in areas electrified with direct current.

Key words: Electric rolling stock, regenerative braking, train high-voltage single-wire DC or AC main line**,** combined heating.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе как в России, так и в мире широко применяется рекуперативное торможение (рекуперация). Рекуперация имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как повышение энергоэффективности перевозок, электрическая и механическая устойчивость, что удобно для поддержания постоянной скорости на спусках, снижение расхода тормозных колодок и износа бандажей электрического подвижного состава (ЭПС). Современный подвижной состав с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) позволяет производить рекуперативное торможение до низких скоростей. Однако применение рекуперации на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе имеет ряд особенностей, связанных с использованием вырабатываемой тяговыми электродвигателями (ТЭД) энергии. Вопросы полезного использования энергии рекуперации рассмотрены в настоящей статье.

1. Возврат энергии при рекуперативном торможении. Чтобы проанализировать количественно возврат энергии в сеть, необходимо иметь статистические данные о возврате электроэнергии в сеть в результате рекуперативного торможения. К сожалению, ОАО «РЖД» не

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

раскрывает подобную статистику, однако среднее значение возврата энергии по отношению к потребленной на тягу, можно рассчитать по данным Федеральной службы государственной статистики «Росстат» и материалам из открытых источников [1, 2] и аналогичных. Год к году возврат энергии от применения рекуперации увеличивается (Рис.1), при этом сама оценка энергоэффективности выполняется как Российскими, так и международными организациями [3].

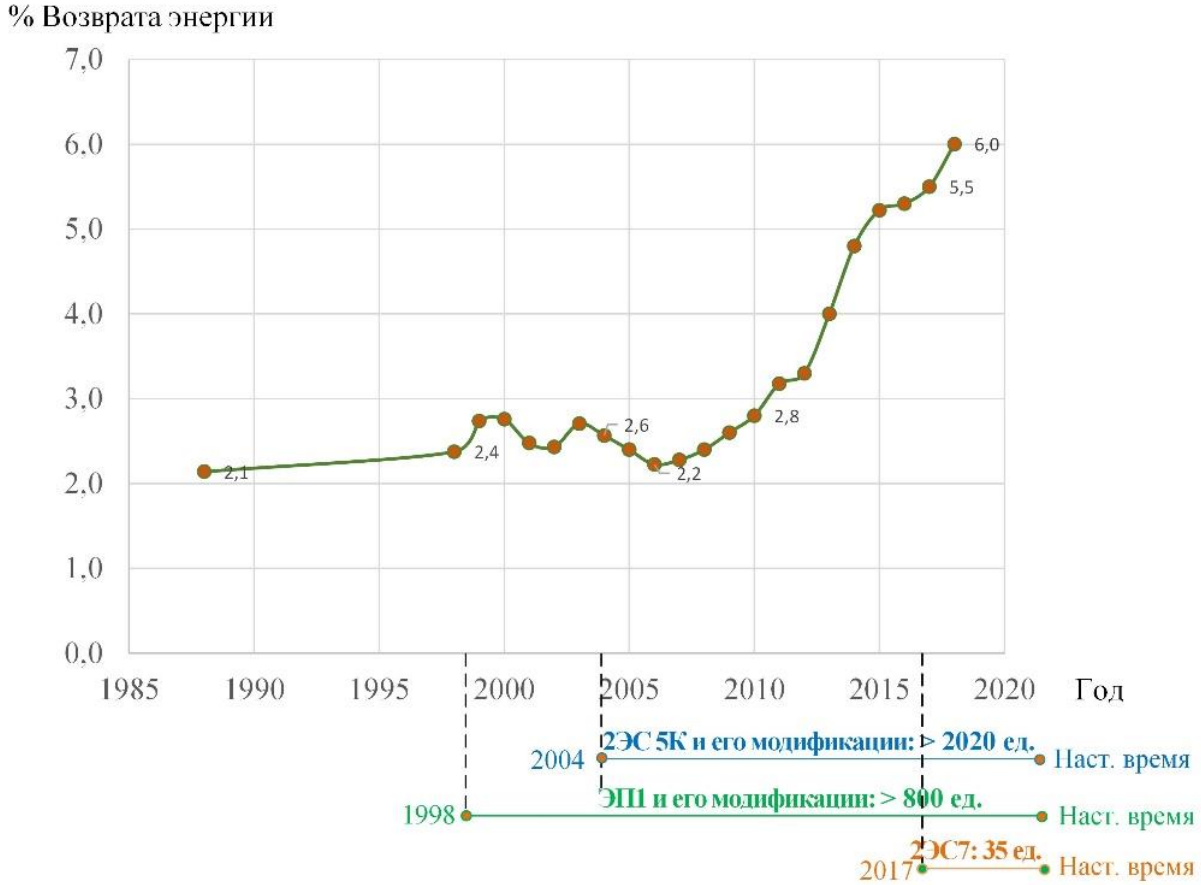


Рис. 1. Возврат энергии в контактную сеть на ж.д. транспорте РФ

Это связано, прежде всего, с внедрением современных электровозов переменного тока, в том числе с асинхронными тяговыми двигателями (на рисунке отмечен только выпуск массовых серий электровозов). Однако резервы далеко не исчерпаны – в мире имеются примеры возврата до 15 % и более энергии.

2. Особенности применения рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе. К сожалению, применение рекуперативного торможения на постоянном токе требует наличия потребителя на участке секции контактной сети, либо инверторных преобразователей на тяговых подстанциях. Регулировочные торможения имеют небольшую продолжительность, часто менее 1 минуты, в течение которой ТЭД вырабатывают значительную

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

мощность, сопоставимую с часовой мощностью электровоза или электропоезда и доходящую до 6–7 тыс. кВт. Все чаще рекуперативное торможение применяется на пассажирских электровозах. Пример – двухсистемный электровоз ЭП20, работающий на постоянном токе [4, 5]. На участке с интенсивным движением поездов принять эту мощность не составляет труда – с большой вероятностью на участке находится поезд, работающий в режиме тяги. Такая ситуация характерна для МЦК, пригородных участков Москвы. Однако на участках с менее интенсивным движением рост напряжения на токоприемнике не приводит к росту тока ТЭД, так как подстанции с диодными выпрямителями не могут осуществить передачу энергии в энергосистему. При этом на ЭПС с рекуперацией происходит отключение торможения или переход на реостатное (ступенчатый или плавный, в зависимости от типа ЭПС). В любом случае, в этой ситуации использование энергии торможения становится невозможным. В литературе имеется описание большого количества систем, предназначенных для повышения эффективности рекуперации на участках постоянного тока с небольшим объемом движения. К ним относятся:

- установка инверторов на тяговых подстанциях;
- создание электрического соединения с соседними секциями контактной сети;
- использование энергии рекуперации для питания вспомогательных машин и систем электровозов;
- Установка накопителей энергии на ЭПС (гибридизация).

Установка инверторов на тяговых подстанциях является крайне затратным мероприятием, она выполняется только на подстанциях, расположенных на участках с затяжными спусками, на которых рекуперация осуществляется постоянно и отдача энергии значительная.

Электрическое соединение на постах секционирования возможно, однако мощность передачи на больших плечах в системе 3 кВ сильно ограничена.

Оборудование подвижного состава накопителями энергии позволяет применять рекуперацию независимо от наличия потребителя в контактной сети, однако это увеличивает массу ЭПС и некоторых случаях может не повысить, а снизить энергетическую эффективность. Поэтому гибридизация с установкой накопителей применяется только в тех случаях, когда необходимо придать ЭПС какие-либо новые свойства, например автономный ход [6].

Использование энергии рекуперации для вспомогательных нужд на самом локомотиве возможно, однако вспомогательные потребители имеют небольшую мощность и не играют решающей роли в потреблении энергии рекуперации.

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

3. Использование энергии рекуперативного торможения для отопления. Энергию торможения вполне можно использовать для работы климатических установок электропоездов и пассажирских вагонов, имеющих мощность, сопоставимую с мощностью ТЭД электровозов и электропоездов, необходимо только синхронизировать их с процессом торможения, что вполне возможно реализовать с использованием современных технологий передачи информации. Идея использования системы отопления как нагрузки ТЭД при электрическом торможении не нова и применяется на некоторых типах троллейбусов и трамваев, но при реостатном торможении. В то же время современные нагреватели плохо подходят в качестве тормозных резисторов, так как рассчитаны на питание постоянным по величине напряжением, а использование штатных тормозных резисторов в качестве нагревателей не может обеспечить стабильный нагрев воздуха, вследствие чего такие системы не получили широкого распространения.

Большинство современных видов пассажирского подвижного состава имеют мощные системы электрического отопления, питающиеся от контактной сети. Пассажирские вагоны локомотивной тяги выпускаются с автономной, смешенной и централизованной высоковольтной системами электроснабжения, причем чаще используются две последние. При смешанной системе электроснабжения питание низковольтных потребителей (освещение, вентиляция, кипятильник, насосы, туалеты с управлением, иногда кондиционер и вспомогательное отопление) осуществляется от подвагонного генератора и аккумуляторной батареи по двухпроводной схеме с напряжением 52 В или 110 В постоянного тока [7–9]. Основное электрическое отопление получает питание от локомотива (электровоза или оборудованного дополнительным генератором тепловоза) по однопроводной высоковольтной подвагонной магистрали с напряжением 3 кВ как на участках как постоянного, так и переменного тока (Рис. 2).

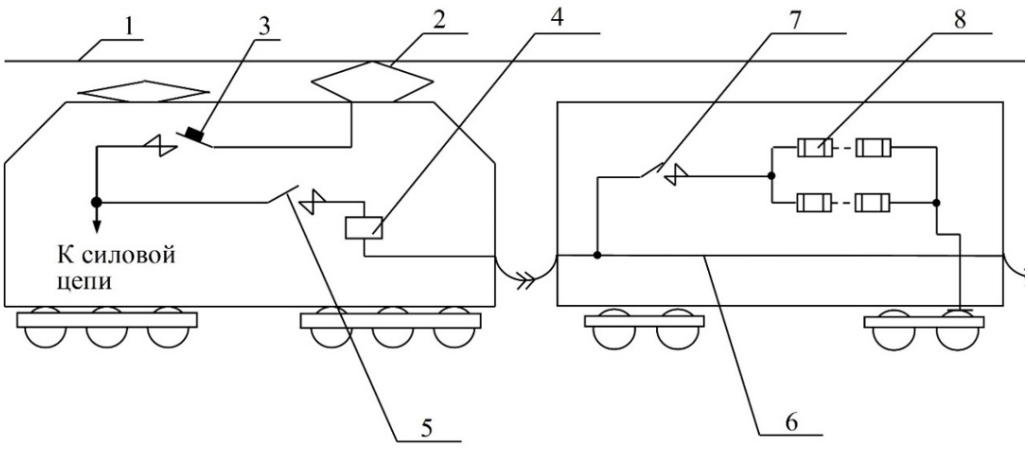


Рис. 2. Упрощенная схема высоковольтного отопления
пассажирского поезда на участке постоянного тока

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

1 – контактная сеть постоянного тока с напряжением 3000В;
2 – токоприемник электровоза;
3 – быстродействующий выключатель (БВ);
4 – токовое реле;
5 – контактор отопления; магистраль (однопроводная) с напряжением 3000В;
7 – контактор отопления на вагоне;
6 – высоковольтная однопроводная магистраль
8 – высоковольтные электронагреватели нагреватели системы отопления вагонаобщей мощностью 48 кВт

На вагонах имеется высоковольтная схема с контакторами, аппаратурой автоматики и защиты. Потребителями являются высоковольтные трубчатые электронагреватели (ТЭНы) общей мощностью 48 кВт. Наиболее часто применяется комбинированное отопление водяного типа, а ТЭНы служат для подогрева воды в котле (котел можно отапливать и углем). Сухотопочный тип системы отопления широко используется в вагонах электропоездов. Кроме описанных, в последние годы все шире стала применяться централизованная высоковольтная система отопления, при которой все энегоснабжение вагонов осуществляется от электровоза по подвагонной магистрали с использованием преобразователей, а подвагонные генераторы не устанавливаются. Так как при таком типе электроснабжения вагон может эксплуатироваться только на электрифицированных участках, котел выполняется с чисто электрическим подогревом, без топки для угля. Таким образом, пассажирский поезд нормальной составности при работающем отоплении (осенне-зимний период) всегда имеет потребители общей мощностью 800–960 кВт. На вагонах с централизованной высоковольтной системой энергоснабжения имеется также установка кондиционирования мощностью 22–30 кВт, получающая питание от магистрали с напряжением 3 кВ. Отопление вагонов работает в режиме повторно – кратковременного включения, продолжительность включения (ПВ) зависит от температуры наружного воздуха и может изменяться от 10 до 80 %. Как правило, в отопительном котле установлены термодатчики, не допускающие повышения температуры более 92 ^{0}С, так как система комбинированного водяного отопления является открытой. При понижении температуры до 85 ^{0}С ТЭНы повторно включаются. Это предотвращает закипание воды в котле. Емкость системы водяного отопления составляет 850–950 литров, в зависимости от конструкции вагона.

С точки зрения электротехники, схема электровоза в режиме рекуперации с работающей системой отопления поезда представляет собой схему постоянного тока, в которой имеется узел, соединяющий 4 ветви: ветвь ТЭД или ТЭД с преобразователями, работающих в режиме генераторов (источника); ветвь токоприемника, подключенная к контактной сети, ветвь тормозных резисторов с импульсным

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

преобразователями и ветвь отопления вагонов (Рис. 3). Входящим является ток ТЭД, работающих в режиме генераторов, а исходящими – токи рекуперации в контактную сеть Iр.кс, тормозного резистора Iрт, и ток отопления Iо.

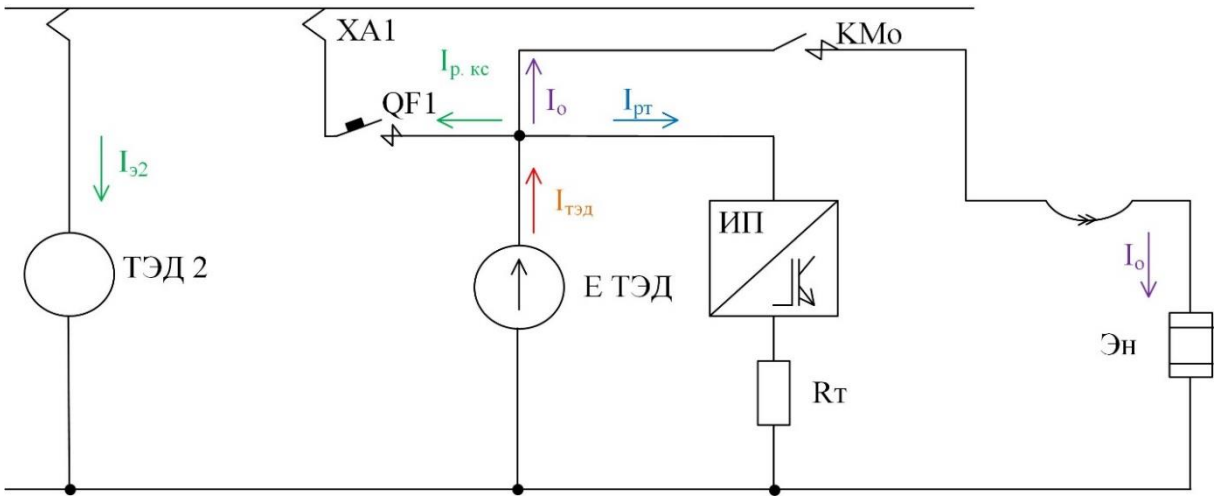


Рис. 3. Схема рекуперации:
Е ТЭД – тяговые двигатели рекуперирующего электровоза;
QF– БВ (или БК);
ИП – импульсный преобразователь;
Rт – тормозной резистор;
Эн – нагреватели системы отопления вагонов;
КМо – контактор отопления;
ТЭД2 – тяговые электродвигатели какого-либо электровоза в режиме тяги на той же секции контактной сети

При наличии в контактной сети потребителя в виде электровоза 2 (ТЭД2) с мощностью, равной или большей, чем мощность рекуперации и неработающем отоплении вагонов ток рекуперации Iр.кс имеет максимальное возможное значение, определяемой заданной машинистом рекуперирующего электровоза тормозной силой. Если электровоз 2 прекратит работу в режиме тяги, включается в работу импульсный преобразователь ИП, регулирующий ток тормозного резистора Iрт таким образом, чтобы напряжение на токоприемнике ХА1 не превышало 3,9 кВ. При этом в контактную сеть отдается максимально возможная по условию наличия потребителя энергия. Если в этот момент включить отопление, то в узле возникнет дополнительный исходящий ток отопления $I_о$, что позволит на эту же величину уменьшить ток тормозного резистора, так как входящий в узел ток определяется реализуемой тормозной силой.

Если несколько (на 5–7 %) снизить температуру срабатывания термодатчиков (термореле) котла, то это никак не скажется на работе системы отопления, однако создаст резерв для использования энергии рекуперации, используя теплоемкость системы отопления. При этом

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

защита от закипания воды в котле останется в работе. Таким образом, одновременно с режимом рекуперации от электровоза должен поступать сигнал о необходимости включения нагревателей системы отопления и циркуляционного насоса для лучшей теплопередачи. Вырабатываемая тяговыми двигателями энергия будет накапливаться в виде тепловой энергии, запасенной в системе водяного отопления. На современных электровозах, на которых при недостаточной нагрузке ток тормозных резисторов плавно увеличивается за счет работы импульсного преобразователя, эффект будет выражаться в виде уменьшения тока тормозных резисторов и увеличения тока высоковольтной подвагонной магистрали. При этом температура воды в котле повысится, и повторное включение отопления произойдет позже, что позволит уменьшить потребление энергии из контактной сети на отопление.

На вагонах с централизованной высоковольтной системой отопления можно также кратковременно увеличить интенсивность охлаждения, зарядный ток батареи, включить компрессор и другие потребители, позволяющие использовать энергию рекуперации. На современных вагонах в системе электрооборудования используется микропроцессорная система управления и диагностики (МСУД), поэтому вопрос изменения алгоритма работы контакторов решается ее простым перепрограммированием. Наиболее сложно обеспечить распознавание режима рекуперации, так как сигнал о её применении необходимо передать с электровоза (выявление повышения напряжения в подвагонной высоковольтной магистрали может говорить не только о применении рекуперации, но и просто о приближении поезда к тяговой подстанции).

Реализовать передачу сигнала от электровоза к вагонам можно с использованием технологической радиосвязи типа GSM-R [10,11], однако не все участки оборудованы такой системой. Поэтому лучше использовать систему передачи данных PLC, используемую для передачи информации по проводам ЛЭП [12]. Некоторое увеличение потребления энергии на передачу информации в данном случае не имеет значения, так как данная энергия все равно была бы рассеяна в тормозных резисторах.

Главным достоинством такой системы является отсутствие существенных затрат на модернизацию системы отопления (меняется только алгоритм). Данная система в таком виде пригодна только для пассажирских электровозов с рекуперативным торможением на постоянном токе, количество которых невелико. Чтобы использовать энергию рекуперации грузовых электровозов, необходимо разработать алгоритм выявления рекуперативного торможения и систему для его реализации, устанавливаемую на пассажирских вагонах. На электропоездах с рекуперативным торможением использовать предложенный принцип еще проще – необходимо всегда включать отопление при рекуперации (в осенне-зимний период), что легко

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

реализовать с помощью обычных релейных схем. При некоторых доработках систем торможения, принцип работы может использоваться и на пассажирских тепловозах, оборудованных высоковольтной подвагонной магистралью. Кроме того наличие канала связи PLC позволит решить и другие проблемы (например, обеспечение устойчивой связи между машинистом и начальником поезда на участках, не оборудованных радиосвязью, передачу телеметрической информации).

ВЫВОДЫ

1. Использование энергии рекуперации на постоянном токе затруднительно, так как связано с наличием потребителя в контактной сети.

2. В качестве дополнительного потребителя в контактной сети можно использовать систему отопления пассажирского поезда, необходимо только синхронизировать работу электронагревателей с рекуперативным торможением.

3. В качестве канала связи между электровозом и вагонами пассажирского поезда хорошие перспективы имеет система передачи данных PLC.

Библиографический список / References

1. Рекорд взят. Статья на официальном сайте газеты «Гудок» от 11.12.2011. [Rekord vzyt. Oficial'nyj sajt gazety “Gudok” ot 11.12.2011. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://gudok.ru/content2/transport/zd/884553/
2. Рекуперация в этом году бьёт рекорды. Официальный сайт газеты «Гудок». [Rekuperaciya v ehtom godu b'yot rekordy. Oficial'nyj sajt gazety “Gudok” (In Russ.)]. Доступно по: https://gudok.ru/newspaper/amp/?ID=1352219&archive=2016.10.06 Ссылка активна на 20.05.2023.
3. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Евстафьева М.В. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т.14. – №1. – С.119–126. [Tytova TS, Yevstafiyev AM, Izvaryn MY, Yevstafiyeva MV. Assessment of energy efficiency of rail activity with the specific units of measurement application. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;14(1):119-126 (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=29112744
4. Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации 3ТС.085.003 РЭ [Ehlektrovoz magistral'nyj EHP20. Rukovodstvo po ehkspluatacii 3TS.085.003 REH]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: it.su/techinfoV72.html
5. Смаглюков Д.А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20. (Учебное пособие). – М.: Российские железные дороги, 2015. – 360 с. [Smaglyukov DA. *Ustrojstvo i ehkspluataciya ehlektrovoza EHP20*. (Uchebnoe posobie). Moscow: Rossijskie zheleznye dorogi; 2015. 360 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://zlibrary-asia.se/book/3524030/9e7112

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

6. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2. // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 2(81). – С. 52–55. [Titova TS, Evstaf'ev AM, Izvarin MYu, Sychugov AN. Prospects for development of traction rolling stock. part 2. *Transport of the Russian Federation.*- 2019;2(81):52-55 (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/xpzijq Ссылка активна на 31.05.2023.
7. Егоров В.П. Устройство и эксплуатация цельнометаллических пассажирских вагонов. (Учебник для техн. училищ.) – М.: Высшая школа, 1984. – 232 с. [Egorov VP. *Ustrojstvo i ehkspluataciya cel'nometallicheskikh passazhirskikh vagonov*. (Uchebnik dlya tekhn. uchilishch.) Moscow: Vysshaya shkola; 1984. 232 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://instructionsrzd.ucoz.ru/load/dlja_vagonnikov/egorov_v_p_ustrojstvo_i_ehkspluatacija_passazhirskikh_vagonov_dlja_provodnikov/11-1-0-509
8. Комаров Ю.И. Электрооборудование пассажирских вагонов локомотивной тяги нового поколения. Сб. науч. ст.: Подвижной состав 21 века: идеи, требования, проекты. – СПб: ПГУПС, 2001. – С. 114–123. [Komarov YuI. *Ehlektrooborudovanie passazhirskikh vagonov lokomotivnoj tyagi novogo pokoleniya.* Sb. nauch. st.: Podvizhnoj sostav 21 veka: idei, trebovaniya, proekty. St. Petersburg: PGUPS; 2001. pp. 114-123 (In Russ.)].
9. Зорохович А.Е., Гаврилов Я.И., Реморов А.А., Кадуба Ю.Н. Электрооборудование вагонов. (Учебник для вузов железнодорожного транспорта). – М.: Транспорт, 1982. – 367 с. [Zorokhovich AE, Gavrilov YaI, Remorov AA, Kaduba YuN. *Elektrooborudovanie vagonov*. (Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta). Moscow: Transport; 1982. 367 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01001104281
10. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 1. // Беспроводные технологии. – № 1(58). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast'1. *Wireless technologies*. 2020;1(58):48-56 (In Russ.)]. Доступно по: https://wireless-e.ru/gsm/gsm-r/radioset-upravleniya-chast-1/ Ссылка активна на 12.06.2023.
11. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 2. // Беспроводные технологии. – № 2(59). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast' 1. *Wireless technologies*. 2020;2(59):48-56. (In Russ.)]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: https://wireless-e.ru/application/railway/radioset-upravleniya-chast-2/
12. Шишкин Ф.Д., Бростилов С.А., Трусов В.А. Технология Power Line Communication и ее применение // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. (Материалы семинара). – 2015. – № 18. – С. 402–406. [Shishkin FD, Brostilov SA, Trusov VA. Tekhnologiya Power Line Communication i ee primenenie. *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh.* (Materialy seminara). 2015;18:402-406 (In Russ.)].

Сведения об авторах:
Кузнецов Андрей Альбертович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Изварин Михаил Юльевич, кандидат технических наук, доцент;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Information about the authors:
Andrey A. Kuznetsov, Doctor of Technical Science, professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Mikhail Y Izvarin, Candidate of Technical Sciences, docent;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Цитировать:
Кузнецов А.А., Изварин М.Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 33–43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43

To cite this article:
Kuznetsov AA, Izvarin MYu. Use of regenerative braking energy in the passenger coaches heating system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):33-43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333
DOI 10.17816/transsyst20239244-56

© А.А. Лисов, А.Г. Возмилов, Н.Ю. Кулева, А.И. Согрин, Р.А. Закиров, Р.Ю. Илимбетов
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
(Челябинск, Россия)

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Цель: выбор тягового электродвигателя для грузового электротранспорта, работающего в условиях Арктики.

Методы: Для решения поставленной цели были рассмотрены основные характеристики существующих видов электродвигателей постоянного и переменного тока, а также приведены данные об использовании того или иного типа двигателей в современном электротранспорте.

Результаты: Сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к 2 основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами (СДПМ) и асинхронному двигателю (АД). Оба типа двигателей в полной мере подходят для решения поставленной цели. Однако, как выяснилось в последствии СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как АД в большинстве случаев используется для более тяжелого транспорта.

Заключение: В результате анализа было решено, что для электротранспорта, работающего в условиях Арктики, наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, электротранспорт специального назначения, Арктика.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, A.G. Vozmilov, N.Yu. Kuleva, A.I. Sogrin, R.A. Zakirov, R.Yu. Ilimbetov
South Ural State University (NRU)
(Chelyabinsk, Russia)

SELECTION OF A TRACTION ELECTRIC MOTOR FOR ARCTIC ELECTRIC TRANSPORT

Aim: selection of a traction motor for electric freight transport operating in the Arctic.

Methods: To achieve this aim, the main characteristics of existing types of DC and AC electric motors were considered, as well as data on the use of one or another type of motor in modern electric vehicle.

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

Results: A comparative analysis of the most common motors has led to 2 main leaders - a permanent magnet synchronous motor (PMSM) and an induction motor (IM). Both types of motors are fully suitable for solving the aim. However, as it turned out later, PMSM is more often used for light vehicles, while IM in most cases is used for heavier vehicles.

Conclusion: As a result of the analysis, it was decided that for electric transport operating in the Arctic, the best option is to use an induction motor as a traction motor.

Key words: traction electric motor, special-purpose electric transport, Arctic.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают транспортные средства (ТС), которые в своем составе имеют тяговый электропривод (ТЭП). Электротранспорт стал бурно развиваться не только из-за экономических и экологических причин, но и благодаря развитию аккумуляторных батарей (АКБ), увеличения емкости АКБ и скорости их зарядки, уменьшению массогабаритных показателей и стоимости. Электромобили могут применяться как в городской среде, так и вне ее. Решение транспортных задач вне городской среды часто связано с передвижением в районах со слаборазвитой или разрушенной дорожной сетью [1–3]. При эксплуатации ТС по дорогам общего пользования, снежной целине или по местности с грунтами со слабой несущей способностью ТЭП, например, служит дополнительным источником механической энергии, увеличивающим крутящий момент колес необходимый для преодоления препятствий и подъемов.

В нашем случае, разрабатываемая в рамках комплексного проекта по разработке высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации колесная машина высокой проходимости «Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем» имеет в своем составе активный привод, состоящий из генератора, накопителя электрической энергии и электрического двигателя для привода ведущего моста.

Работа электродвигателя грузового транспорта в Арктических условиях представляет особые вызовы из-за экстремально низких температур, сильных ветров, а также наличия снега и льда. Для обеспечения надежной работы электродвигателя в таких условиях следует учитывать следующие специфические требования.

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

Термическая защита. Электродвигатель должен быть способен работать в широком диапазоне температур, включая экстремально низкие значения (до минус 50 °C).

Защита от влаги, коррозии и льда. В Арктической зоне влажность и наличие льда являются обычными явлениями. Влажная и соленая атмосфера Арктики может вызывать коррозию и повреждения электродвигателя.

Сопротивление вибрации. Грузовой транспорт в Арктике сталкивается с неровностями дорог и другими сложными условиями, которые могут привести к сильным вибрациям.

Низкая мощность пуска. Желательно, чтобы двигатель имел как можно меньший пусковой ток для экономии заряда АКБ.

Энергоэффективность. В условиях Арктики доступ к энергии может быть ограниченным. Поэтому электродвигатель должен быть энергоэффективным, чтобы снизить потребление электроэнергии и обеспечить более длительное время работы от ограниченного источника энергии.

Кроме того, не менее важными показателями являются желательно низкая стоимость, высокая надежность и высокий КПД в широком диапазоне скоростей [4–6].

ОБЗОР ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На Рис. 1 приведены различные типы тяговых двигателей переменного и постоянного тока, которые потенциально могут быть применены в качестве тяговых для ТС. В связи с развитием силовых электронных коммутационных устройств и аппаратных средств стало возможным применение в качестве тяговых машины с дискретной коммутацией [7–11].

Данные машины обычно ассоциируется с двумя основными типами: бесщеточными двигателями постоянного тока (БДПТ) и вентильными реактивными электродвигателями (ВРД) [7, 8]. Машины этой категории работают по принципу машин постоянного тока, но с коммутацией при помощи специального инвертора [10].

Двигатели постоянного тока

У двигателей данного типа очень простой механизм регулирования скорости, который может быть реализован посредством обычной широтно импульсной модуляции (ШИМ) [12]. Ранее за счет наличия простого принципа регулирования скорости и малой развитости полупроводниковой техники они были широко распространены в электрифицированной транспортной отрасли, в частности, для трамваев и троллейбусов [7, 8]. Однако наличие щеточно-коллекторного узла делает работу двигателей постоянного тока менее надежной и невозможной без периодического

Received: 23.04.2021 Revised: 31.05.2021 Accepted: 30.06.2021
Поступил: 23.04.2021 Одобрена: 31.05.2021 Принята: 30.06.2021

обслуживания, поэтому данное решение не будет оптимальным для ТС, находящихся в сложных климатических условиях. Кроме того, эти двигатели дольно громоздки, обладают низким КПД, низкой надежностью (из-за щеточно-коллекторного узла), и имеют низкую удельную мощность [13–17]. Поэтому применение двигателей данного типа не рекомендуется как для современного легкого электротранспорта, так и для грузового, в том числе специального назначения, работающего в условиях Арктики.

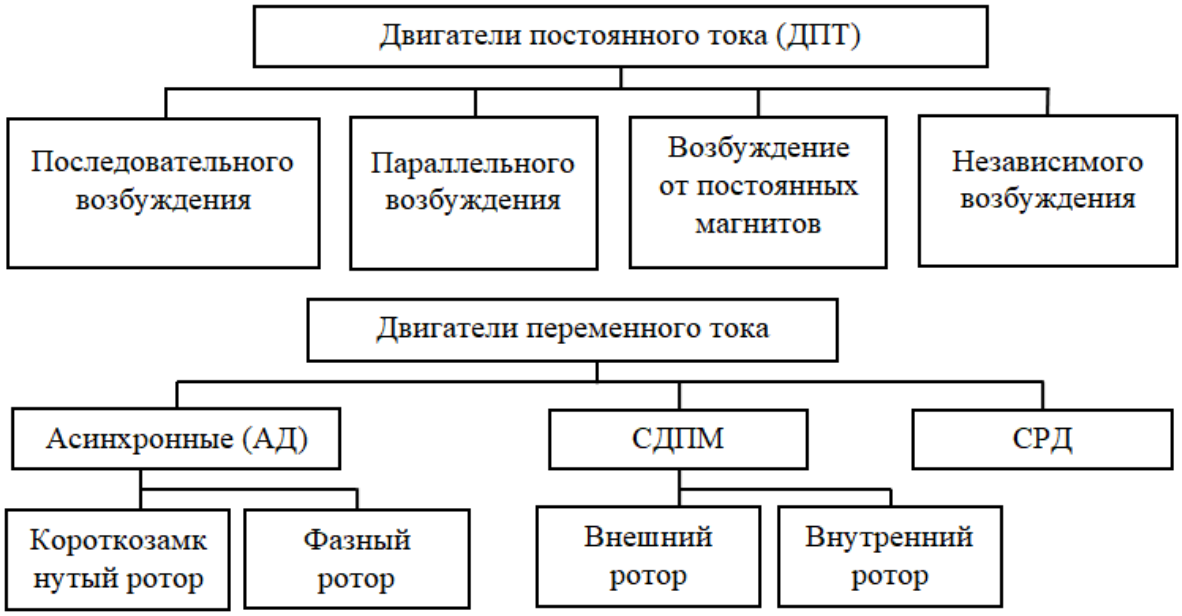


Рис 1. Тяговые двигатели постоянного и переменного тока для ТС

Источник: составлено авторами

Асинхронные двигатели

Асинхронные двигатели (АД) являются одними из наиболее широко используемых тяговых двигателей благодаря своим ключевым характеристикам, таким как низкая цена, низкие требования к обслуживанию и простота подключения при наличии трехфазной сети питания [5, 7, 8, 16–19]. В АД потери в меди ротора зависят от скольжения двигателя. Высокоэффективные АД предназначены для работы с величиной скольжения менее 3 %, что дает меньшие потери в сердечнике ротора [20].

Стоит отметить, что конкуренцию асинхронным двигателям составляют синхронные двигатели с постоянными магнитами из-за наличия у последних более высокой удельной мощности, высокого КПД и меньших потерь в роторе. Еще одним недостатком асинхронных двигателей является наличие нелинейной механической характеристики, которая сильно подвержена влиянию величины питающего напряжения

Received: 23.04.2021 Revised: 31.05.2021 Accepted: 30.06.2021
Поступил: 23.04.2021 Одобрена: 31.05.2021 Принята: 30.06.2021

как показано на Рис. 2. Если применить к двигателям данного типа требования, предъявленные к электротранспорту, работающему в Арктических условиях, то он сможет удовлетворить большинству из них, кроме пункта о низкой мощности пуска.

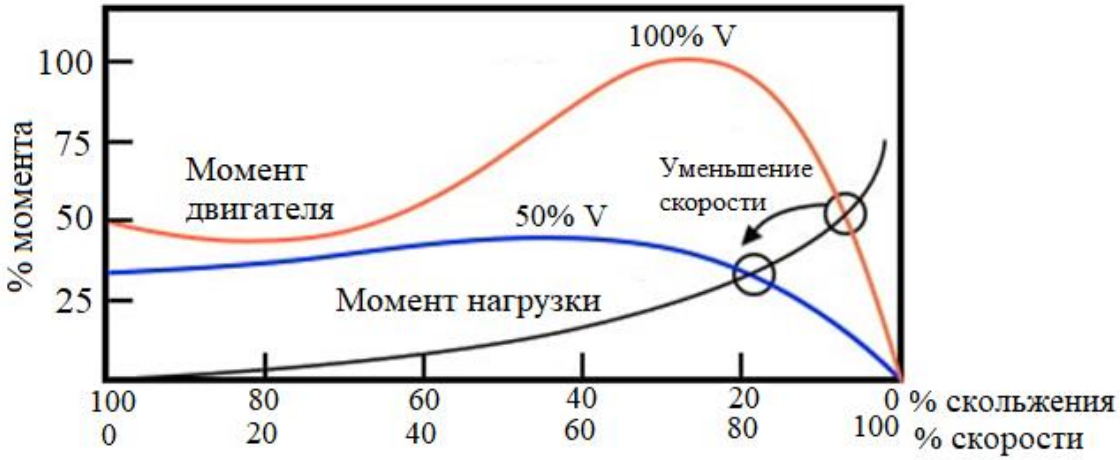


Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Источник: составлено авторами

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ)

У двигателей данного типа на роторе находятся постоянные магниты и при помощи датчиков Холла, а также системы управления с силовыми ключами (инвертора) происходит переключение обмоток статора, которое создает вращающееся магнитное поле, за которым следует ротор двигателя. Постоянные, в особенности редкоземельные, магниты обеспечивают высокую удельную мощность, небольшой вес и объем двигателя, а также высокую эффективность работы за счет снижения потерь в роторе [21]. Также эти двигатели обладает достаточной жесткостью естественной характеристики (Рис. 3) и относительной линейностью характеристик, по сравнению с асинхронным двигателем (Рис. 2).

Основными особенностями СДПМ являются:

- высокая эффективность и компактность за счет использования высокоэнергетических постоянных магнитов [15, 22];
- легкость охлаждения за счет отсутствия тока у ротора, нагревающейся частью является только статор [22];
- низкие эксплуатационные расходы, большой срок службы и надежность за счет отсутствия щеток и механических коммутаторов [8, 23];
- низкий уровень шума, поскольку не требуются механические щетки или контактные кольца [8, 22].

Received: 23.04.2021 Revised: 31.05.2021 Accepted: 30.06.2021
Поступил: 23.04.2021 Одобрена: 31.05.2021 Принята: 30.06.2021

Данные двигатели имеют самый высокий КПД среди всех двигателей, доступных сегодня [21, 24]. Однако стоит отметить некоторые недостатки, которые включают в себя высокую стоимость из-за присутствия редкоземельных магнитов, которые также могут размагничиваться под действием высоких температур [8, 20, 22] и обязательное наличие полупроводникового инвертора.

Данный тип двигателей с одной стороны отлично подходит для целей Арктического транспорта, но с другой он намного дороже АД.

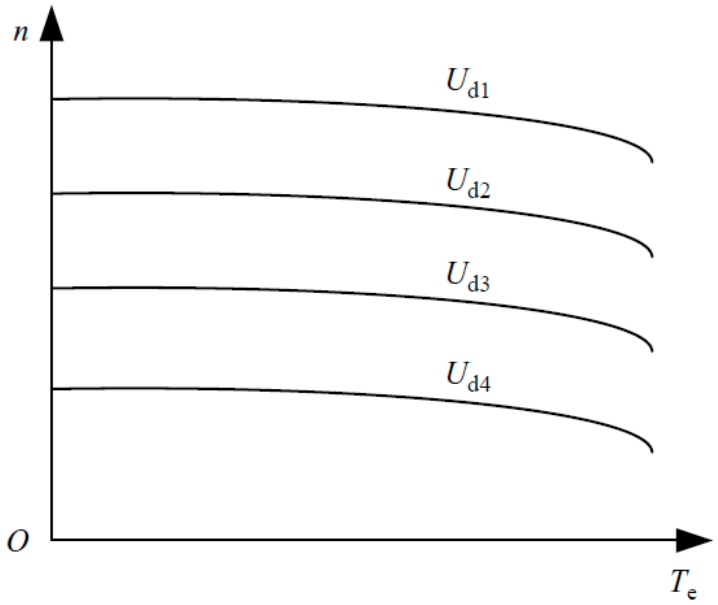


Рис. 3. Механическая характеристика BLDC-двигателя с постоянными магнитами ($U_{d1} > U_{d2} > U_{d3} > U_{d4}$)

Источник: [21]

Вентильный реактивный электродвигатель (ВРД)

Ротор и статор ВРД выполнены в виде пакетов листов магнитомягкого материала. На роторе ВРД отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Фазные обмотки находятся только на статоре. Для уменьшения трудоемкости изготовления катушек обмотки статора могут изготавливаться отдельно, а затем надеваться на полюсы статора. Простота изготовления позволяет достичь высокой надежности, устойчивости к рабочим температурам и высокого диапазона скоростей [25]. Режим постоянной мощности может быть увеличен до 6–7 раз от базовой скорости [26]. Характеристики СРД в основном зависят от конструкции полюсов ротора и требуют некоторого компромисса между постоянной мощностью и постоянным крутящим моментом [27].

Конструкция и основные варианты использования ВРД хорошо объяснены в [28, 29], из этих же исследований можно выделить несколько особенности данных двигателей:

Received: 23.04.2021 Revised: 31.05.2021 Accepted: 30.06.2021
Поступил: 23.04.2021 Одобрена: 31.05.2021 Принята: 30.06.2021

- простая конструкция ротора без использования магнитов или обмоток, что отлично подходит для высокоскоростных приложений, относительно легко охлаждается и обладает нечувствительностью к высокой температуре окружающей среды;
- невысокая цена (на уровне асинхронных двигателей).

Стоит отметить, что разработка и управление ВРД довольно сложна и как в случае с СДПМ невозможна без использования специального инвертора и датчиков положения ротора. Сильное влияние также оказывает насыщение наконечников полюсов и краевой эффект полюсов и пазов [8]. Шум, пульсация крутящего момента и вибрация являются основными проблемами этих двигателей, особенно на высоких скоростях, поскольку работа основана на последовательном возбуждении диаметрально противоположных обмоток статора.

На низкой скорости шум в основном возникает из-за резонансов, вызванных пульсацией крутящего момента, и может быть уменьшен путем соответствующего профилирования форм сигналов фазового тока [27]. При высокой скорости вращения этот шум возникает из-за резонансов радиальной вибрации [30].

Если сравнивать с ранее приведенными двигателями, то явного преимущества для электротранспорта специального назначения, он не имеет. Поэтому для принятия окончательного решения следует подробнее рассмотреть АД и СДПМ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АД И СДПМ

Выбор тягового электродвигателя основывается на нескольких факторах, включая ограничения транспортного средства, эксплуатационные требования и тип источников энергии [1, 8, 31, 32]. При проектировании привода электромобиля необходимо учитывать следующие моменты:

- тип напряжения питания тягового двигателя и способ управления им;
- максимальные возможности по скоростным характеристикам и диапазону уровней напряжения и тока в системе;
- количество тяговых электродвигателей и одно- или многоступенчатой трансмиссии в гибридной системе;
- тип накопителя энергии и его максимальная энергоемкость.

Если опираться на результаты исследований [13, 14, 18, 33], то можно прийти к выводу, что в общем случае для современного электротранспорта по удельным показателям мощности, цены, надежности и сложности управления наиболее лучшим образом подходят ранее рассмотренные АД и СДПМ.

Received: 23.04.2021 Revised: 31.05.2021 Accepted: 30.06.2021
Поступил: 23.04.2021 Одобрена: 31.05.2021 Принята: 30.06.2021

Поскольку однозначный ответ в выборе двигателя не был получен, то на основе исследований [34–38] была составлена Табл. 1, отображающая тип двигателя, используемого в качестве тягового для легкового электротранспорта, для тяжелых кроссоверов и коммерческих микроавтобусов и, наконец для автобусов и грузовых транспортных средств.

Из данных в Табл. 1 видно очевидное преобладание СДПМ - двигателей для легковых седанов и хетчбэков, в то время как на тяжелых кроссоверах уже чаще применяется асинхронный двигатель специального исполнения. Для коммерческого транспорта, такого как автобусы, а также для тяжелых грузовых транспортных средств в абсолютном большинстве используется асинхронный двигатель.

Таблица 2. Тяговые двигатели, применяемые для электромобилей и гибридов

Производитель	**Модель**	**Тяговый двигатель**
Nissan	Tino, Leaf, Altra	СДПМ
Honda	Insight, Accord, Civic	СДПМ
Toyota	Prius C & V	СДПМ
Toyota	Highlander, Avalon	СДПМ
Toyota	Camry	СДПМ
Ford	Fusion SE Hybrid	СДПМ
Ford	C Max Hybrid SEL	СДПМ
Hyundai	Blueon	СДПМ
Chevrolet	Volt & Energi	СДПМ
Renault	Kangoo	АД
Chevrolet	Silverado	АД
Daimler Chrysler	Durango	АД
Tesla	Roadster	АД
Honda	Fit EV	АД
Toyota	Reva4	АД
REVA	NXR	АД
Ford	Focus Electric	АД
Ford	Transit Connect	АД
GM	EV1	АД
BMW	X5	АД
Volkswagen	e-Crafter	СДПМ
Volvo	FM Electric (грузовик)	АД
ЛиАЗ	ЛиАЗ-6274.20 «e-Citymax 18» (автобус)	АД
КамАЗ	КАМАЗ-6282 (автобус)	АД
VolgaBus	Ситиритм 12 ELF	АД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к двум основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами и асинхронному двигателю.

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

Как было сказано ранее, тяговый электропривод, работающий в тяжелых арктических условиях, должен обладать рядом защит от внешних условий и высокой ремонтопригодностью. Оба типа двигателей в полной мере подходят для данных задач в виду возможности исполнения закрытого корпуса и простоты конструкции.

Обзор применяемых в электротранспорте двигателей показал, что СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как асинхронный двигатель используется для более тяжелого транспорта.

Вышеперечисленные факты, а также более привлекательная цена позволяют заключить, что для поставленной цели наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации» с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по Соглашению №075-11-2021-058 от 25.06.2021г. (Идентификатор государственного контракта 000000S407521QLY0002) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Акционерным обществом «Автомобильный завод «УРАЛ» в кооперации с Головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». НИОКТР выполнен в организации Головного исполнителя НИОКТР.

Авторы заявляют, что:

1. у них нет конфликта интересов;
2. настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Chan CC, Bouscayrol A, Chen K. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. IEEE transactions on vehicular technology. 2009;2;59(2):589-98. doi: 10.1109/TVT.2009.2033605
2. Ehsani M, Rahman KM, Toliyat HA. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on industrial electronics. 1997 Feb;44(1):19-27. doi: 10.1109/41.557495
3. Boldea I, Tutelea LN, Parsa L, Dorrell D. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014 Jan 21;61(10):5696-711. doi: 10.1109/TIE.2014.2301754
4. Hashemnia N, Asaei B. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In2008 18th International Conference on Electrical Machines 2008 Sep 6 (pp. 1-5). IEEE. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157
5. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular technology. 2006 Nov 13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/TVT.2006.878719
6. Yildirim M, Polat M, Kürüm H. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. In2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2014 Sep 21 (pp. 218-223). IEEE. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715
7. Finch JW, Giaouris D. Controlled AC electrical drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008 Jan 31;55(2):481-91. doi: 10.1109/TIE.2007.911209
8. Ehsani M, Gao Y, Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. CRC press; 2003.
9. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. Oxford,[Eng.]; New York: Oxford University Press; 1998.
10. Abu-Rub H, Iqbal A, Guzinski J. High performance control of AC drives with Matlab/Simulink. John Wiley & Sons; 2021 Apr 6.
11. Leonhard W. Controlled AC drives, a successful transition from ideas to industrial practice. Control Engineering Practice. 1996 Jul 1;4(7):897-908. doi: 10.1016/0967-0661(96)00087-1
12. Gupta V. Working and analysis of the H-bridge motor driver circuit designed for wheeled mobile robots. In 2nd International Conference on Advanced Computer Control 2010 Mar 27. 2010;3:441-444. IEEE. doi: 10.1109/ICACC.2010.5486818
13. Chang L. Comparison of AC drives for electric vehicles-a report on experts' opinion survey. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 1994;9(8):7-11. doi: 10.1109/62.311235
14. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular technology*. 2006;13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/62.311235
15. Chan CC. An overview of electric vehicle technology. Proceedings of the IEEE. 1993;81(9):1202-13. doi: 10.1109/5.237530
16. De Santiago J, Bernhoff H, Ekergård B, Eriksson S, Ferhatovic S, Waters R, Leijon M. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. IEEE Transactions on vehicular technology. 2011;61(2):475-84. doi: 10.1109/TVT.2011.2177873

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

17. Lungoci CM, Georgescu M, Calin MD. Electrical motor types for vehicle propulsion. In 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2012 May 24. 2012:635-640. IEEE. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231985
18. Chan CC. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2002;90(2):247-75. doi: 10.1109/5.989873
19. Pellegrino G, Vagati A, Boazzo B, Guglielmi P. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. IEEE Transactions on industry applications. 2012 Nov 15. 2012;48(6):2322-32. doi: 10.1109/TIA.2012.2227092
20. Bilgin B, Emadi A. Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system. IEEE Power Electronics Magazine. 2014 Jun 23. 2014;1(2):10-7. doi: 10.1109/MPEL.2014.2312275
21. Miller TJ, Rabinovici R. Back-EMF waveforms and core losses in brushless DC motors. IEE Proceedings-Electric Power Applications. 1994 May 1. 1994;141(3):144-54. doi: 10.1049/ip-epa:19941080
22. Emadi A, editor. *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. CRC press; 2017 Dec 19.
23. Nian X, Peng F, Zhang H. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014 Jan 14. 2014;61(10):5798-808. doi: 10.1109/TIE.2014.2300059
24. Jahns TM. Motion control with permanent-magnet AC machines. *Proceedings of the IEEE*. 1994 Aug. 1994;82(8):1241-52. doi: 10.1109/5.301686
25. Kiyota K, Sugimoto H, Chiba A. Comparing electric motors: An analysis using four standard driving schedules. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2014 Apr 23. 2014;20(4):12-20. doi: 10.1109/MIAS.2013.2288380
26. Rahman KM, Fahimi B, Suresh G, Rajarathnam AV, Ehsani M. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. IEEE transactions on industry applications. 2000 Jan. 2000;36(1):111-21. doi: 10.1109/28.821805
27. Zhu ZQ, Howe D. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007 Apr 30. 2007;95(4):746-65. doi: 10.1109/JPROC.2006.892482
28. Miller TJ, editor. *Electronic control of switched reluctance machines*. Elsevier; 2001 May 18.
29. Miller TJ. Switched reluctance motors and their control. 1993 Jan.
30. Cameron DE, Lang JH, Umans SD. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992 Nov. 1992;28(6):1250-5. doi: 10.1109/28.175275
31. Rajashekara K. Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. 2013 Apr 23. 2013;1(1):3-10.
32. Hesla E. Electric propulsion [history]. *IEEE Industry applications magazine*. 2009 Jun 12. 2009;15(4):10-3.
33. Kumar L, Jain S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Jan 1. 2014;29:924-40. doi: 10.1016/j.rser.2013.09.014
34. Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Лисов А.А., Илимбетов Р. Ю. Разработка и моделирование пропорционально-интегрального регулятора для

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

электронного дифференциала электротрактора сельскохозяйственного назначения // Вестник Башкирского Государственного Аграрного Университета. – 2022. – №. 2(62). – С. 119–124. [Vozmilov AG, Urmanov VG, Lisov AA, Ilimbetov RYu. Development and simulation of the proportional and integral regulator for the electronic differential of an electric farm tractor. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2022;2(62):119-124 (Russ., Engl.)]. doi: 10.31563/1684-7628-2022-62-2-119-124

35. Gozálvez J, Sepulcre M, Bauza R. IEEE 802.11 p vehicle to infrastructure communications in urban environments. IEEE Communications Magazine. 2012 May 7. 2017;50(5):176-83. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194400

36. Kenney JB. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. Proceedings of the IEEE. 2011 Jun 16. 2011;99(7):1162-82. doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790

37. Maddox J, Sweatman P, Sayer J. Intelligent vehicles+ infrastructure to address transportation problems–a strategic approach. In 24th international technical conference on the enhanced safety of vehicles (ESV) 2015 Jun.

38. Конев В.В., Карнаухов Н.Н., Мерданов Ш.М., Половников Е.В. Электрический привод строительно-дорожных машин // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3(101). – С. 65–73. [Konev VV, Karnaukhov NN, Merdanov ShM, Polovnikov EV. Electric drive of road construction machines. *Architecture, Construction, Transport*. 2022;3(101):65-73. (In Russ.)]. doi: 10.31660/2782-232X-2022-3-65-73

Сведения об авторах:
Лисов Андрей Анатольевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Возмилов Александр Григорьевич, профессор, д.т.н;
eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;
E-mail: vozmiag@rambler.ru

Кулева Надежда Юрьевна, научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;
E-mail: kulevani@susu.ru

Согрин Андрей Игоревич, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;
E-mail: sogrinai@susu.ru

Закиров Рамиль Агзамович, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;
E-mail: zakirovra@susu.ru

Илимбетов Рафаэль Юрикович, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;
E-mail: ilimbay@yandex.ru

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

Information about the authors:
Andrey A. Lisov, postgraduate student;
eLibrary SPIN 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Alexander G. Vozmilov, Professor, Doctor of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;
E-mail: vozmiag@rambler.ru

Nadezhda Yu. Kuleva, Research associate;
eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;
E-mail: kulevani@susu.ru

Andrey I. Sogrin, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;
E-mail: sogrinai@susu.ru

Ramil A. Zakirov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;
E-mail: zakirovra@susu.ru

Rafael Yu. Ilimbetov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;
E-mail: ilimbay@yandex.ru

Цитировать:
Лисов А.А., Возмилов А.Г., Кулева Н.Ю. и др. Выбор тягового электродвигателя для Арктического электротранспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 44–56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56

To cite this article:
Lisov AA, Vozmilov AG, Kuleva NYu, et al. Selection of a traction electric motor for Arctic electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):44-56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56

Received: 23.04.2021 **Revised: 31.05.2021** **Accepted: 30.06.2021**
Поступил: 23.04.2021 **Одобрена: 31.05.2021** **Принята: 30.06.2021**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 656.21
DOI 10.17816/transsyst20239257-65

© А.В. Сугоровский[1], А.В. Сугоровский[2]
[1]АО «Институт экономики и развития транспорта»
(Москва, Россия)
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ТИПОВОЙ ИМИТАЦИОННЫЙ ПАССАЖИРСКИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ, УЗЛОВ И СТАНЦИЙ

Цель: создание типового имитационного модуля пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической универсальными приемами.

Методы: для достижения поставленной цели использованы методы имитационного моделирования и математической статистики.

Результаты: в типовом имитационном модуле пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической реализовано: прибытие и отправления поездов, перестановка составов на перронные пути с путей пассажирской технической станции по расписанию; передвижения по горловине поездных и маневровых локомотивов; вариантность технологии, выбор приоритетной секции прибытия, в зависимости от ее свободности и с учетом занимаемых в горловине каналов, выполнением операции; диспетчерское регулирование, а именно заблаговременная подача на перронные пути с путей пассажирской технической станции в момент свободности горловины; расчет минимального количества маневровых локомотивов.

Заключение: создание типового имитационного пассажирского модуля позволит в полном соответствии с технологией и реализацией диспетчерского регулирования моделировать работу пассажирских и пассажирских технических станций, а также работу с пассажирскими поездами на любых других станциях сети железных дорог.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пассажирская станция, горловина, пассажирская техническая станция, система ИМЕТРА.

RUBRIC 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© A.V. Sugorovsky[1], A.V. Sugorovsky[2]
[1]JSC Institute of economy and development of transport
(Moscow, Russia)
[2] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

A TYPICAL SIMULATION PASSENGER MODULE FOR A COMPREHENSIVE STUDY OF RAILWAY DIRECTIONS, JUNCTIONS AND STATIONS

Aim: to create a typical simulation module of a passenger station in interaction with a passenger technical universal techniques.

Methods: methods of simulation modeling and mathematical statistics were used to achieve this goal.

Results: as a result of processing empirical data using the Statistics application package, the sample mean, standard deviation and coefficient of variation were obtained. In the course of various experiments with the model of the functioning of the transport system, the necessary volumes of work for the development of promising volumes of work were determined: track development and the number of shunting locomotives.

Conclusion: in a typical simulation module of a passenger station, in cooperation with a passenger technical station, the following was implemented: arrival and departure of trains, rearrangement of trains on the apron tracks from the tracks of a passenger technical station according to the schedule; movement along the neck of train and shunting locomotives; the variability of technology, the choice of the priority arrival section, depending on its freedom and taking into account the channels occupied in the neck, the execution of the operation; dispatcher regulation, namely, advance delivery to the apron tracks from the tracks of the passenger technical station at the time of the neck's freedom; calculation of the minimum number of shunting locomotives. Conclusion: the creation of a typical simulation passenger module will allow, in full accordance with the technology and implementation of dispatching regulation, to simulate the operation of passenger and passenger technical stations, as well as work with passenger trains at any other stations of the railway network.

Key words: simulation modeling, passenger station, neck, passenger technical station, IMATRA system

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года в рамках научного обеспечения формирования единого транспортного пространства России на базе рационального развития транспортной инфраструктуры предусмотрено «*проведение имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры (в особенности, проектов развития крупных транспортных узлов);….. комплексное исследование на моделях функционирования проектируемых транспортных объектов с выдачей их реальной пропускной способности, «узких мест» и показателей работы, а также разработка предложений по корректировке проектов на основании имитационной экспертизы*» [1]. Эти задачи решаются с помощью программного обеспечения «Имитационное моделирование работы железнодорожных направлений и узлов (ИМ ЖНУ)», система ИМЕТРА [2–6].

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

В Транспортной стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года обозначена цель: «*Повышение мобильности населения и развитие внутреннего Туризма*» и приведены перспективные размеры перевозок пассажиров различными видами транспорта [7]. На Рис. 1 приведена диаграмма железнодорожных перевозок пассажиров в дальнем следовании с динамикой по годам.

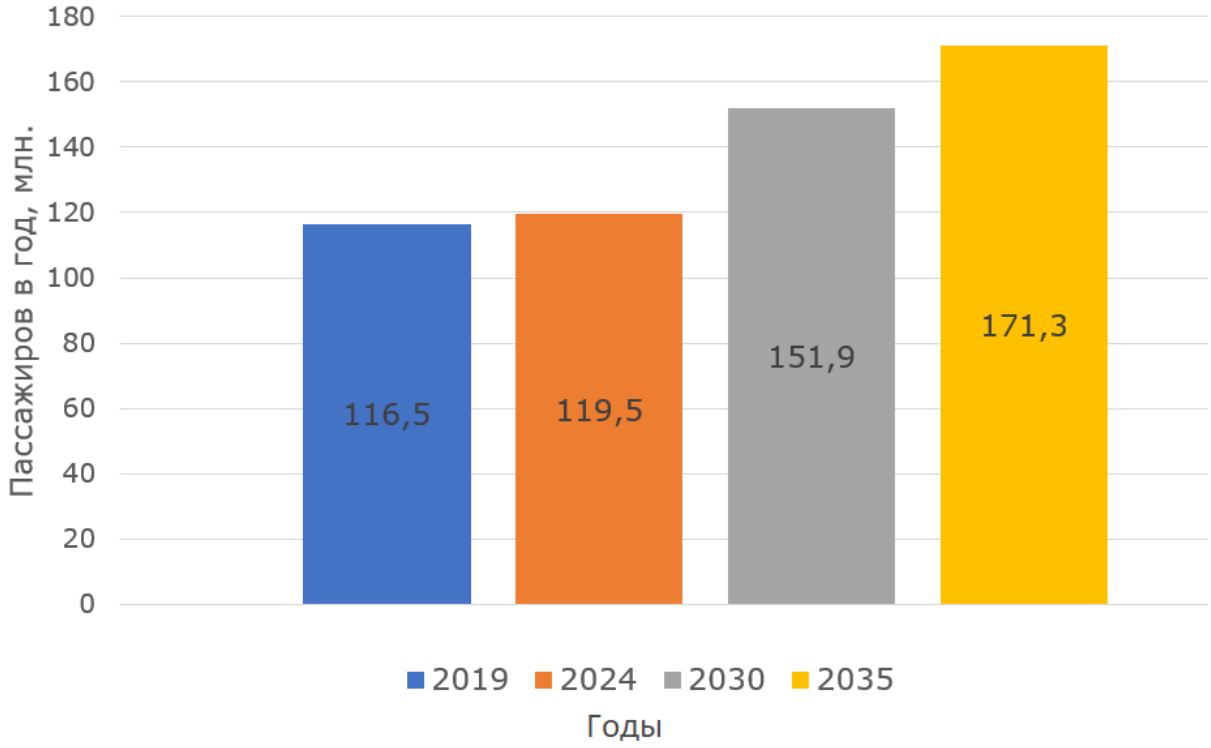


Рис. 1. Железнодорожные перевозки пассажиров в дальнем следовании с динамикой по годам

Из Рис. 1 видно, что с 2024 по 2035 год прогнозируется увеличение числа перевезенных пассажиров более чем на 50 миллионов человек в год. В связи с ростом размеров перевозок пассажиров при анализе работы железнодорожных узлов и полигонов возникает задача установления количества поездов, которые получится дополнительно принять на рассматриваемые пассажирские станции (ПС) в соответствии с графиком движения поездов (ГДП), а при реконструкции – определение необходимого и достаточного технического и технологического обеспечения пассажирской и пассажирской технической станций (ПТС) [8].

На сети железных дорог России в настоящее время по характеру выполняемой работы расположено 54 крупных пассажирских станций, в том числе 11 тупикового типа (по схеме путевого развития).

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

Поскольку на пассажирских станциях тупикового типа имеет место большая загрузка единственной горловины станции, в которой выполняются все операции по приему, отправлению и маневровым передвижениям поездов различных категорий, большое число враждебных маршрутов, вызванное встречными передвижениями организованных поездов, маневровых составов, поездных и маневровых локомотивов, горловина оказывает существенное влияние на загрузку других устройств станции. Для корректного отображения загрузки горловины и занятия перронных путей необходимо точно и технологически верно прописать все виды передвижений по станции и ее горловине [9]. Эта задача достаточно трудоемкая и сопряжена с риском ошибок, поэтому создание типового модуля работы пассажирской станции тупикового типа во взаимодействии ее с примыкающей к ней пассажирской технической станцией актуальна [10].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ТИПОВОГО ИМИТАЦИОННОГО ПАССАЖИРСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ, УЗЛОВ И СТАНЦИЙ

Для достижения поставленной цели: создание типового имитационного модуля пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской-технической универсальными приемами, требуется решить ряд задач:

- обеспечить прибытие и отправления поездов, а также перестановку составов на перронные пути с путей ПТС по расписанию, используя принципы макромоделирования;
- прописать занятие горловины подачей/уборкой поездных и маневровых локомотивов;
- обеспечить определение минимального количества маневровых локомотивов;
- реализовать диспетчерское регулирование: заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины;

Прибытие поездов по расписанию реализуется достаточно просто (как в системе ИМЕТРА, так и в других подобных программах, созданных для имитационного моделирования) [11–14]. На Рис. 2 представлены способы задания времени отправления поездов по расписанию при макромоделировании, а также погрешности, возникающие при их реализации [15].

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

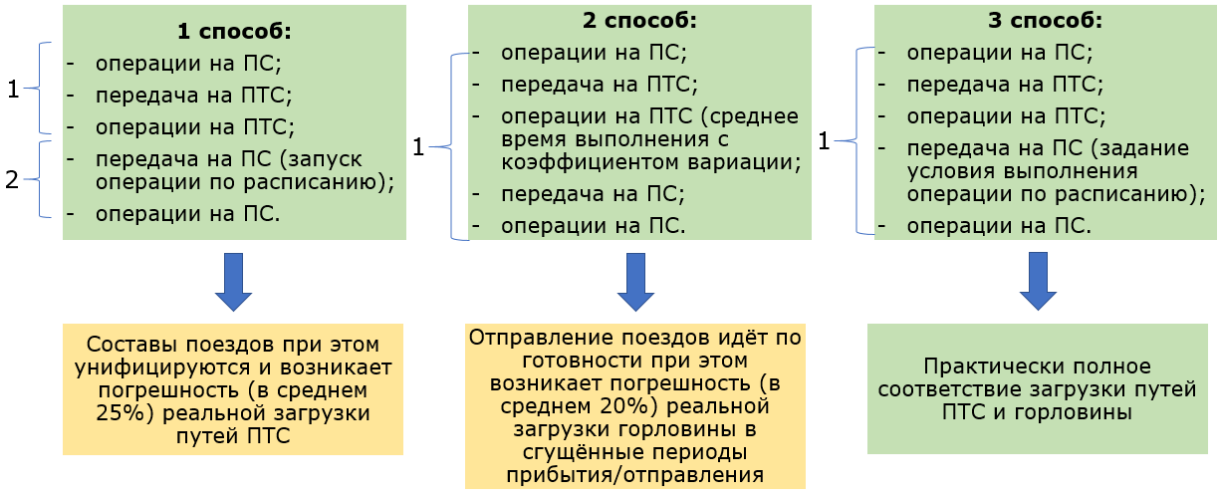


Рис. 2. Способы задания отправления поездов
по расписанию при макромоделировании

По первому способу отправления поездов осуществляется через запуск операции по расписанию, при этом в одной цепочке операций прописывается занятие путей ПС, передача на пути ПТС и занятие путей пассажирской-технической станции, на которой выполняется весь комплекс работ по подготовке составов в очередной рейс. Во второй цепочке операций прописывается передача составов на перронные пути пассажирской станции с путей ПТС. Поскольку операции прописываются двумя цепочками, составы поездов при этом унифицируются. В действительности составы поездов, обращающихся на различных направлениях, имеют свою составность и композицию, поэтому при первом способе возникает погрешность (в среднем 25 %) реальной загрузки путей ПТС.

Во втором способе задания отправления поездов по расписанию все операции с составами прописываются в одной цепочке, что позволяет проследить оборот состава, закрепив соответствие прибывшего и отправленного поездов. При этом принимается среднее время занятия путей ПТС с заданным коэффициентом вариации, что приводит к погрешности (в среднем 20 %) реальной загрузки горловины в сгущенные периоды прибытия/отправления пассажирских поездов.

Поскольку первый и второй способы имеют погрешности, предлагается третий вариант, при котором все операции прописываются в одной цепочке, а передача составов на пассажирскую станцию прописывается через задание специального условия выполнения операции по расписанию.

Многочисленные эксперименты с моделями показали, что для отправления поездов строго по расписанию, а не по готовности в системе ИМЕТРА целесообразно ввести вспомогательную категорию, которая

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

будет «рождаться» в момент отправления поезда по расписанию. При этом с вспомогательной категорией в парк будет поступать локомотив и уже с ним продолжится выполнение операций по цепочке. Это решение является типовым для любой пассажирской и пассажирской-технической станции, моделируемой в программе.

Реализация диспетчерского регулирования, а именно заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины реализуется аналогичным образом, т.е. через «рождение вспомогательной категории.

Достоверно прописать занятие горловины подачей/уборкой поездных и маневровых локомотивов, а также поездными и маневровыми передвижениями получится через дополнительное отображение секционирования путей станции. При этом также удастся прописать выбор приоритетной секции прибытия для каждой категории поездов.

На Рис. 3 представлено схематическое отображение типового модуля, разработанного в «ИМ ЖНУ» для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций.

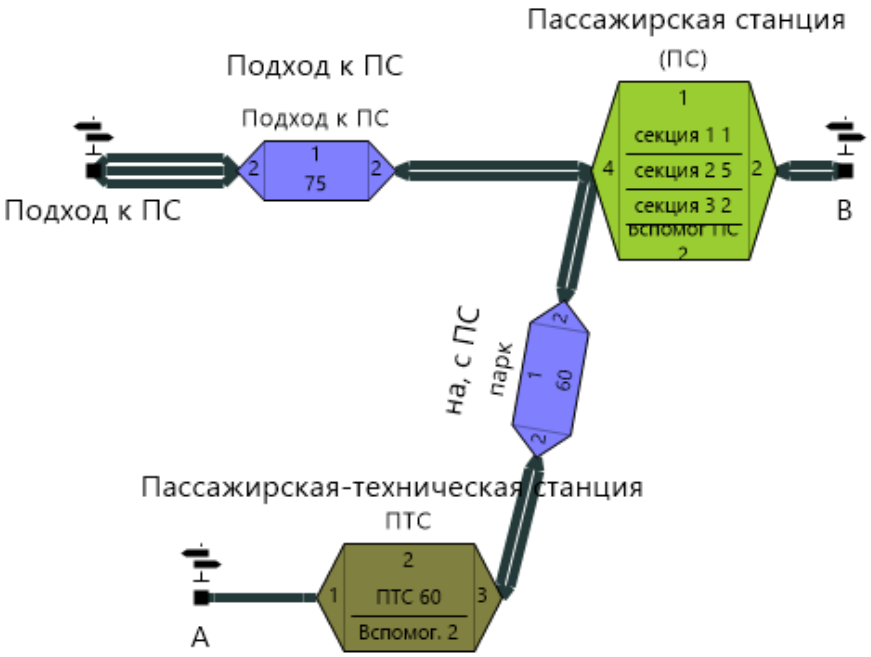


Рис. 3. Схематическое отображение типового модуля пассажирской станции тупикового типа во взаимодействии с пассажирской-технической станцией

На Рис. 3 видно, что типовой имитационной модуль пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической представлен в виде четырех «бункеров», при этом «бункер» пассажирской станции поделен на три основных секции, что позволяет более детально прописать занятие горловины и одну вспомогательную, обеспечивающую прием вспомогательной категории. Пассажирская техническая станция

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

представлена двумя «бункерами», позволяющими анализировать ее работу при макромоделировании. Стоит отметить, что при необходимости более детального анализа, пассажирская техническая станция может быть разделена на дополнительные парки («бункеры»).

ВЫВОДЫ

В типовом имитационном модуле пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской-технической реализовано:

- прибытие поездов по расписанию;
- занятие горловины подачей/уборкой поездных локомотивов;
- занятие горловины передвижениями маневровых локомотивов;
- вариантность технологии: выбор секции прибытия, в зависимости от ее свободности и с учетом занимаемых в горловине каналов, выполнением операции;
- выбор приоритетной секции прибытия;
- перестановка составов на перронные пути с путей ПТС по расписанию;
- диспетчерское регулирование: заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины;
- определение минимального количества маневровых локомотивов
- отправление поездов с пассажирской станции по расписанию.

Таким образом, создание типового имитационного пассажирского модуля позволяет в полном соответствии с технологией и реализацией диспетчерского регулирования моделировать работу пассажирских и пассажирских технических станций, а также работу с пассажирскими поездами на любых других станциях сети железных дорог, это будет способствовать проведению качественной имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры, в том числе проектов развития крупных транспортных узлов.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 N 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». [Order of the Government of the Russian Federation of 17 June 2009. “On the Strategy for the Development of railway Transport in the Russian Federation until 2030”. (In Russ)]. Дата обращения: 25.04.2023. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010?ysclid=lgxcf09a2k884722893

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Kozlov PA, Kolokolnikov VS, Kopylova EV. About simulation modeling and simulation systems. *Transport of the Urals*. 2019;1(60):3-6. doi: 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6

3. Козлов П.А., Тушин Н.А., Пермикин В.Ю., Слободянюк И.Г. Технология макромоделирования транспортных узлов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 3–6. [Kozlov PA, Tushin NA, Permikin VYu, Slobodyanyuk IG. Transport hub macromodelling technology. *Transport of the Urals*. 2014;3(42):3-6. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22369704 Ссылка активна на: 25.04.2023.

4. Kozlov PA, Vakulenko SP, Kozlova VP. Railway junctions from the standpoint of a systematic approach. *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. 2021;3(83):124-130. doi: 10.46973/0201-727X_2021_3_124

5. Kolokolnikov VS, Slobodyanyuk IG. Technology of polygons macromodelling. *Transport of the Urals*. 2019;3(62):48-51. doi: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51

6. Slobodyanyuk IG. Functional approach to modeling of transport systems. *Transport of the Urals*. 2017;2(53):96-101. doi: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». [Order of the Government of the Russian Federation of 27 November 2021. “On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035” (In Russ)]. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents Дата обращения: 25.04.2023.

8. Бородин А.Ф., Николаев К.Ю., Петров А.С. Принципы технологии грузового движения в Санкт-Петербургском железнодорожном узле при перспективной организации пассажирских перевозок // Бюллетень ученого совета АО "ИЭРТ". – 2020. – № 5. – С. 60–67. [Borodin AF, Nikolaev KY, Petrov AS. Principles of freight trains technology with perspective ridership operation at St. Petersburg railway junction. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2020;5:60-67. (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=49301204 Ссылка активна на: 25.04.2023.

9. Покровская О.Д., Аль-Шумари А.С., Кукушкина Я.В., Шманев Т.М. Пассажирский комплекс железных дорог: учеб. пособие. – СПб: ПГУПС, 2023. [Pokrovskaya OD, Al-Shumari AS, Kukushkina YaV, Shmanev TM. *Passazhirskiy kompleks zheleznykh dorog: schoolbook*. St. Petersburg: PGUPS; 2023. (In Russ.)].

10. Borodin AF, Kravchenko AA, Nikolaev KY, et al. Metody gibridnoy tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya pri vybore variantov rekonstruktivnykh meropriyatiy po razvitiyu zheleznodorozhnykh napravleniy i krupnykh uzlov. Proceedings of the Fourteenth International Conference “Management of Large-scale Systems Development (MLSD'2021)”. 2021:963-971. doi: 10.25728/4783.2021.67.10.001

11. Дмитриев Е.О. Методы обоснования вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 26–38. [Dmitriev EO. Substantiation methods of alternative technological modes of railway network polygons operation. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:26-38. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 25.04.2023. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=46279751

12. Бородин А.Ф., Панин В.В., Рубцов Д.В., Щепанов С.Л. Развитие и интеграция информационных технологий управления перевозочным процессом при создании Цифровой Генеральной схемы развития сети ОАО «РЖД» в рамках проекта «Цифровая железная дорога» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 5–14. [Borodin AF, Panin VV, Rubtsov DV, Shchipanov SL. Development

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

and integration of information technologies for managing transportation process of the digital railway project in creating the digital master scheme for Russian railways network development. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:5-14. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46279749 Ссылка активна на: 25.04.2023.

13. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610127/ 10.01.2023. Бюл. № 1. Покровская О.Д., Марченко М.А. Имитационная модель движения скоростных и пассажирских поездов по железнодорожной линии. [Certificate of state registration of a computer program RUS № 2023610127/ 10.01.2023. Byul. № 1. Pokrovskaya OD, Marchenko MA. Simulation model of the movement of high-speed and passenger trains on a railway line. (In Russ.)]. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50132969 Дата обращения: 25.04.2023.
14. Zhuravleva NA. *Simulation modeling of changes in demand for rail transportation. Proceedings of the Twelfth International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry.* INTERAGROMASH 2019. 2019;403:12-23. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012230
15. Petrov AS, Dmitriev EO, Nikolaev KY. Tipovyye moduli imitatsionnogo rascheta krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov. Proceedings of the Twelfth International Conference Managing the Development of Large-scale Systems (MLSD'2019). 2019:633-644. doi: 10.25728/mlsd.2019.2.0633

Сведения об авторах:
Сугоровский Артём Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru
Сугоровский Антон Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Information about the authors:
Artyom V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru
Anton V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Цитировать:
Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 57–65. doi: 10.17816/transsyst20239257-65
To cite this article:
Sugorovsky AV, Sugorovsky AV. A typical simulation passenger module for a comprehensive study of railway directions, junctions and stations. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):57-65. doi: 10.17816/transsyst20239257-65

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК 625.089.21
DOI 10.17816/transsyst20239266-82

© Н.А. Федосеев, В.А. Свальбова, С.В. Алексеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТОГРАММЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Обоснование: Картограмма фрезерования является техническим заданием для машиниста дорожной фрезы.

Цель: Автоматизация процесса составления картограммы фрезерования.

Материалы и методы: Алгоритм поиска наилучшего варианта основан на методе обобщенного приведенного градиента. В качестве программного комплекса используется MS Excel. Источниками ограничений являются требования нормативных документов к качеству проведения работ по фрезерованию.

Результаты: Составленная модель учитывает условия для обеспечения поверхностного водоотвода, а также ограничения, предусмотренные строительными правилами. В качестве целевой функции принято расхождение фактической глубины реза с предпочтительной. Проведен анализ результатов решения и дано сопоставление ручного и автоматизированного расчетов.

Выводы: Использование описанного в статье алгоритма позволяет сократить трудозатраты на составление картограммы в два раза. Аналогично снижается степень отклонения задаваемой глубины реза от целевой, что приводит к снижению объемов перерасхода материалов при дальнейших работах.

Ключевые слова: ремонт улично-дорожной сети, оптимизационная модель, математическое моделирование, фрезерование, ремонт покрытия, картограмма, MS Excel.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, V.A. Svalbova, S.V. Alekseev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

AUTOMATED ALGORITHM FOR DRAWING UP A MILLING CARTOGRAM

Background: The milling cartogram is a technical task for the driver of a road milling cutter.

Aim: Automation the process of drawing up a milling cartogram.

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Materials and methods: The algorithm for finding the best option is based on the generalized reduced gradient method. MS Excel is used as a software package. The sources of restrictions are the requirements of regulatory documents for the quality of milling operations.

Results: The compiled model considers the conditions for ensuring surface drainage, as well as the restrictions provided for by the building regulations. The discrepancy between the actual cutting depth and the preferred one is accepted as the objective function. The analysis of the results of the solution is carried out and a comparison of manual and automated calculations is given.

Conclusion: The use of the algorithm described in the article makes it possible to reduce the labor costs for drawing up a cartogram by half. Similarly, the degree of deviation of the specified cutting depth from the target is reduced, which leads to a decrease in the amount of overspending of materials during further work.

Key words: repair of the road network, optimization model, mathematical modeling, milling, coating repair, cartogram, MS Excel.

ВВЕДЕНИЕ

В период содержания автомобильной дороги и проведения текущих ремонтов крайне распространенной задачей является выравнивание покрытия в продольном и поперечном направлениях. Одной из основных дорожно-строительных машин, позволяющих производить выравнивание покрытия при проведении работ по ремонту улично-дорожной сети (УДС) и автомобильных дорог, является дорожная фреза. В качестве технического задания оператору машины выдается картограмма с указанными на ней глубиной зарезания и направлением и величиной уклона фрезерного барабана в контрольных точках [1]. Для составления картограммы требуется изначально наметить траекторию движения копирной лыжи машины и расположить на ней точки, которые должны обладать тремя характеристиками – глубиной зарезания, величиной поперечного уклона и его направлением. Данные линии называются базовыми линиями (БЛ) – относительно них идет ориентация рабочего органа машины в пространстве и, при производстве работ, может определяться погрешность дорожной фрезы, что позволяет вносить своевременные корректировки в задаваемые параметры процесса (глубина зарезания, поперечный уклон).

Согласно законодательству города Санкт-Петербург в области дорожного строительства при выполнении работ по текущему ремонту УДС наличие проекта вертикальной планировки территории не является обязательным [2]. Подрядчику передается плановое положение элементов УДС, используемое для составления ведомости объемов работ. Вертикальную разбивку в таких случаях подрядные организации производят собственными силами. В силу ограниченности времени, выделяемого на выполнение работ, зачастую составление картограммы фрезерования приходится производить непосредственно во время

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

проведения работ, что снижает производительность звена машин – возникают простои на время проведения разбивки и разработки картограммы.

Цель работы – составление алгоритма расчета картограммы фрезерования с учетом ограничений, обоснованных технологическими характеристиками процесса и нормами строительства. Появление автоматизированного алгоритма поможет сократить продолжительность проведения подготовительных работ при частичной разборке покрытия.

Оптимизационные модели, использование которых возможно для составления алгоритма, можно разделить на несколько категорий в зависимости от метода поиска решения. Сравнение методов приведено в Табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов оптимизации

Метод	**Характеристики метода**	
	Преимущества	***Недостатки***
Линейное программирование [3-5]	1. Однозначное определение глобального оптимума	1. Невозможность решения нелинейных задач
Обобщенный приведенный градиент (ОПГ) [6–8]	1. Возможность решения нелинейных задач 2. Высокая эффективность вычислений при сильно выпуклой функции	1. Склонность к определению локального оптимума
Эволюционный метод [9, 10]	1. Возможность решения задач широкого спектра; 2. Высокая сходимость метода	1. Зависимость результата от настроечных параметров, подбираемых опытным путем 2. Высокая загрузка вычислительных мощностей

Выбор программного комплекса для расчетов зависит от используемой модели оптимизации и ее сложности. Сравнительный анализ наиболее распространенных программ представлен в Табл. 2 [11–14].

Таблица 2. Сравнительный анализ программ

Параметр		**Значение параметра для программы**		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	**Mathcad 15**	**Matlab R2014; «Optimization toolbox»**
Максимальное количество структурных элементов модели	неизвестные переменные	200	∞	∞
	прямые ограничения	400	∞	∞
	непрямые ограничения	100	∞	∞

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Параметр		Значение параметра для программы		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	**Mathcad 15**	**Matlab R2014; «Optimization toolbox»**
Используемые алгоритмы реализации моделей	линейные модели	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ;	1. Симплекс-метод	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ
	нелинейные модели	1. ОПГ; 2. Эволюционный метод	1. ОПГ; 2. Алгоритм Левенберга-Маркуарда; 3. Квази-метод Ньютона	1. ОПГ; 2. Последовательное квадратичное программирование; 3. Метод внутренней точки

Разработка расчетного комплекса производится в программе MS Excel. Данная программа имеет достаточный функционал для решения нелинейных оптимизационных моделей, а также поддерживает установку на смартфон, что повышает доступность расчетного комплекса для инженерно-технических работников, находящихся непосредственно на производственной линии. Расчетный алгоритм должен обеспечивать условия водоотвода и соблюдение требований к проектированию УДС, минимизируя отклонение глубин зарезания рабочего органа в контрольных точках от целевого значения.

ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В первую очередь, для формирования системы ограничений, производится сбор данных для проектирования и анализ технологии работ.

Показатели допустимых поперечных и продольных уклонов устанавливаются СП 396.1325800.2018 [14]. Минимальный поперечный уклон – 5 ‰, максимальный – 30 ‰ (в сложных градостроительных условиях и при проведении работ по реконструкции).

Помимо нормативных ограничений присутствуют технологические – движение машины в процессе фрезерования прямолинейное. БЛ должны быть взаимно параллельны, так как поперечный уклон формируется перпендикулярно по отношению к направлению движения машины.

В местах примыкания к существующему покрытия или бортовому камню глубина зарезания должна соответствовать проектной толщине покрытия.

Результат фрезерования в общем случае – плоскость, параллельная плоскости проектируемого покрытия и лежащая ниже на толщину

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

проектного слоя. Задача сводится к проектированию плоскости с соблюдением вводимых ограничений. Результат расчета алгоритма – поверхность в виде набора точек, представленная на Рис. 1, с постоянными (заранее известными) координатами X и Y (плановое положение) и переменной координатой Z (высотой). Координата Z – неизвестная переменная.

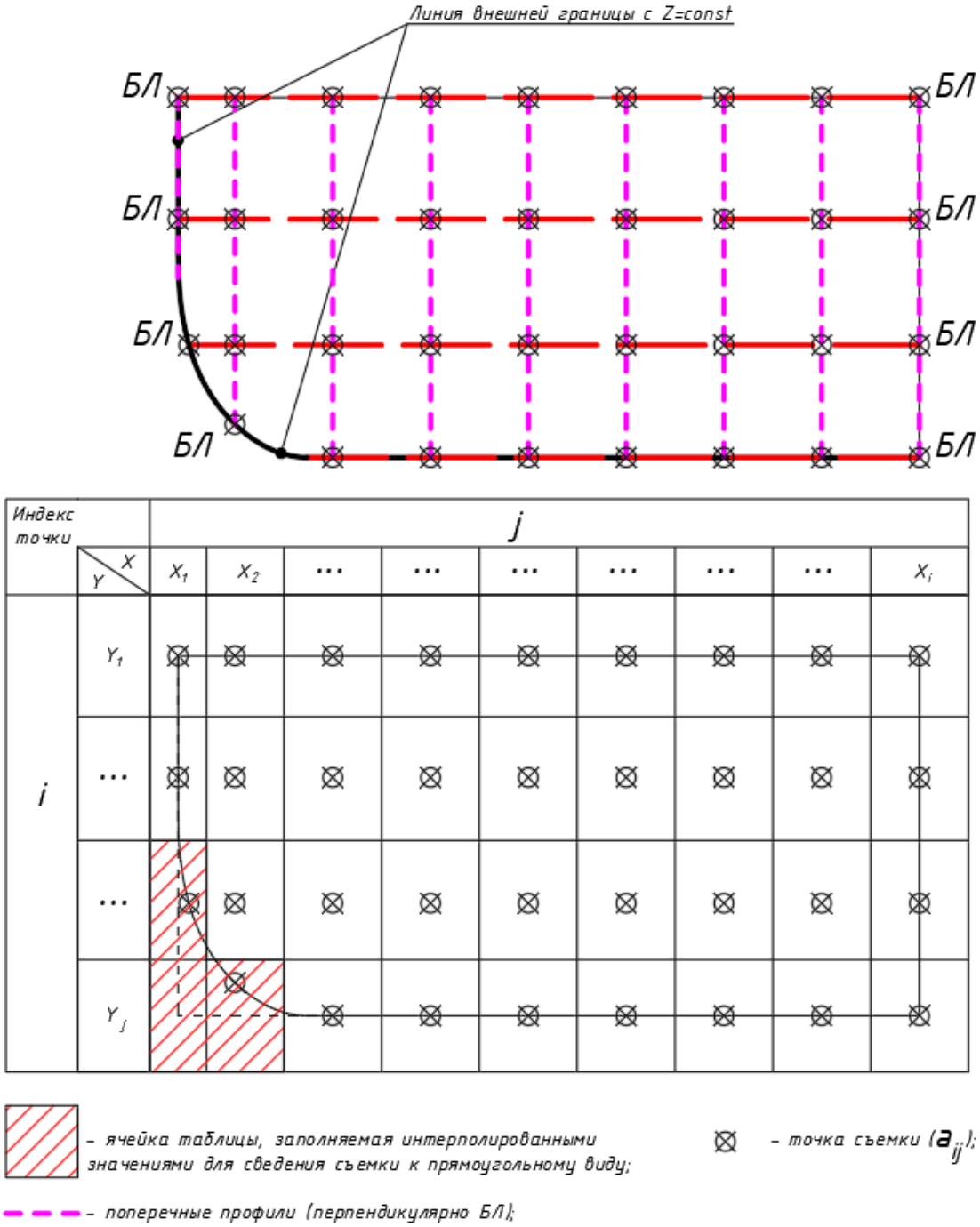


Рис. 1. Плановое изображение поверхности и ее табличная интерпретация

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Исходными данными для алгоритма является съемка существующей поверхности (фактические высотные отметки точек съемки – a_{iJ}; плановое положение точек съемки – X_J и Y_i).

Оценка оптимальности проектной поверхности осуществляется с помощью показателя глубины зарезания рабочего органа машины относительно существующей поверхности. Для точки находится как:

$$h_{iJ} = a_{iJ} - (x_{iJ} - \delta) \quad (1)$$

где x_{iJ} – проектная высотная отметка точки, м;

δ – толщина устраиваемого слоя асфальтобетонного покрытия согласно проекту, см.

Определим условия, соблюдение которых необходимо для выполнения ограничений глубины реза в местах примыкания к бортовому камню:

$$a_{i1} = x_{i1};\ i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

$$a_{iJ} = x_{iJ};\ i = n; J = 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

Для обеспечения соответствия проектных уклонов нормативным требованиям составлены следующие неравенства:

$$\max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} \geq I^{min} \quad (4)$$

где $x_{i-1,J}$; $x_{i+1,J}$; $x_{i,J-1}$; $x_{i,J+1}$ – проектная высотная отметка точек, соседних для точки x_{iJ}, м;

Y_i; Y_{i-1}; Y_{i+1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м;

X_J; X_{J-1}; X_{J+1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

I^{min} – минимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

$$\max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} \leq I^{max} \quad (5)$$

где I^{max} – максимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

Схема, поясняющая выражения (4) и (5), указана на Рис. 2.

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

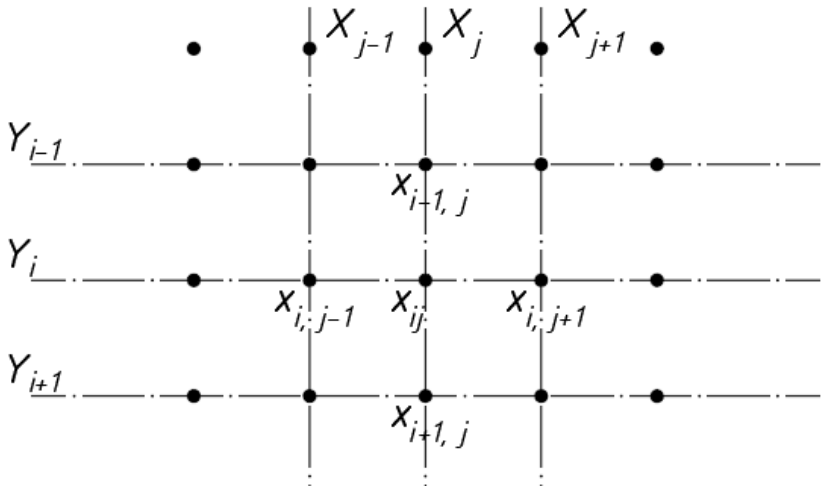


Рис. 2. Схема к определению уклона

После формирования ограничений определяется выражение, описывающее целевую функцию. Так как объект моделирования – площадной, то глубину зарезания стоит рассматривать как средневзвешенную по окрестным для точек площадям (Рис. 3).

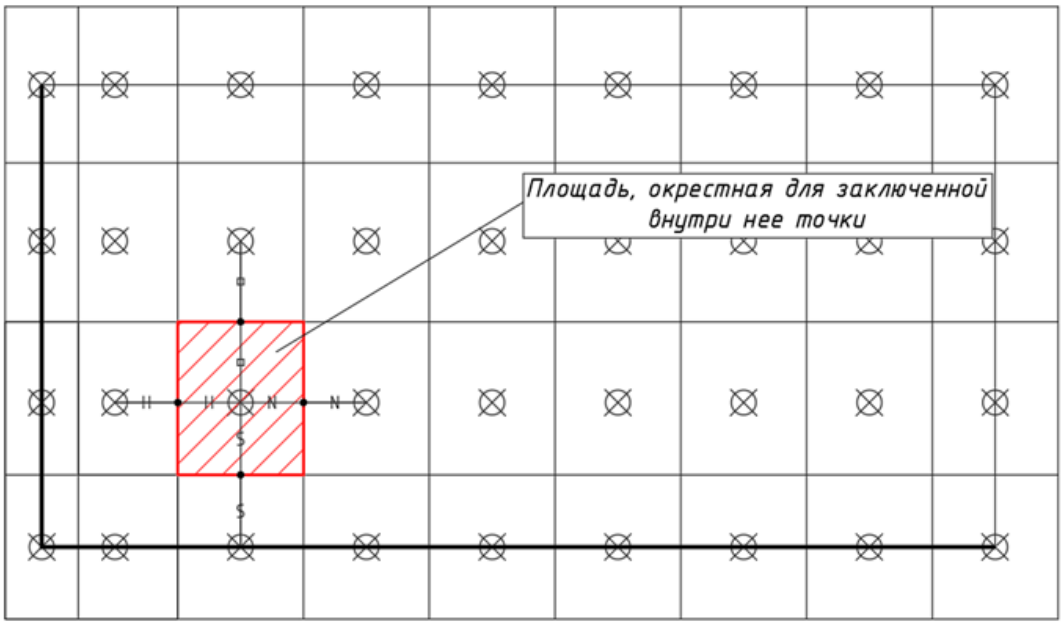


Рис. 3. Схема к определению площади, окрестной для точки

Вес каждой из точек рассчитывается исходя из ее окрестной площади [15]:

$$\sigma_{iJ} = \frac{s_{iJ}}{S_{\text{общ}}} \quad (6)$$

где s_{iJ} – площадь, окрестная для точки съемки a_{iJ}, м^2;

$S_{\text{общ}}$ – площадь всей площадки, м^2.

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

$$s_{iJ} = 0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right) \quad (7)$$

где X_{J+1}; X_{J-1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

Y_{i+1}; Y_{i-1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м.

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} s_{iJ} \quad (8)$$

Критерий оптимальности отображает отклонение фактической глубины зарезания от предпочтительной:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2 \rightarrow min \quad (9)$$

где λ – предпочтительная глубина зарезания, задаваемая пользователем, см.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В Табл. 3 приводятся элементы математической модели.

Таблица 3. Элементы математической модели

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
1	***Общие исходные данные – характеристики структуры объекта***		
1.1	Количество поперечных профилей	ед.	m
1.2	Количество БЛ	ед.	n
1.3	Индекс поперечных профилей	-	J
1.4	Индекс БЛ	-	i
2	***Исходные данные – характеристики проектируемой поверхности***		
2.1	Фактическая высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	м	a_{iJ}
2.2	Координаты поперечного профиля J, $J = 1, 2, \dots, m$	м	X_J
2.3	Координаты БЛ i, $i = 1, 2, \dots, n$	м	Y_i
2.4	Проектная толщина слоя покрытия	см	δ
2.5	Минимальный нормативный уклон	%	I^{min}
2.6	Максимальный нормативный уклон	%	I^{max}
2.7	Предпочтительная глубина зарезания	см	λ

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
3	***Неизвестные переменные***		
3.1	Проектная высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J, $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	м	x_{iJ}
4	***Расчетные характеристики***		
4.1	Максимальный уклон ребер поверхности, лежащих между точкой a_{iJ} и соседними для нее точками, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	%	$maxI_{iJ}$
4.2	Площадь, окрестная для точки a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	м^2	s_{iJ}
4.3	Общая площадь площадки	м^2	$S_{\text{общ}}$
4.4	Вес точки a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	-	σ_{iJ}
5.5	Глубина зарезания в точке a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;$ $J = 1, 2, \dots, m$	см	h_{iJ}
5	***Критерий оптимальности***		
5.1	Суммарное отклонение расчетной глубины зарезания от предпочтительной	см^2	$\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2$

На основании Табл. 3 составлена система выражений, являющаяся оптимизационной моделью.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2 \to min, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (9) \\ h_{iJ} = a_{iJ} - \left(x_{iJ} - \delta\right), i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (1) \\ x_{i1} = a_{i1};\ i = 1, 2, \dots, n-1 & (2) \\ x_{iJ} = a_{iJ};\ i = n; J = 2, 3, \dots, m & (3) \\ maxI_{iJ} \geq I^{min}, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (10) \\ maxI_{iJ} \leq I^{max}, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (11) \\ maxI_{iJ} = max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} & (12) \\ i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & \\ x_{iJ} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (13) \\ \sigma_{iJ} = \frac{0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} 0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right)}, & (14) \\ i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & \end{cases}$$

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Критерий оптимальности и расчетные характеристики раскрыты через исходные данные и неизвестные переменные [16].

Сформированная модель нелинейная – целевая функция и ограничения (10) и (11) нелинейные. Переход к линейному виду невозможен. Применение симплекс-метода не даст решения.

Использование метода ОПГ в общем случае чревато попаданием в локальный оптимум. С учетом сложности ограничений (10) и (11) метод необходимо до начала расчетов вносить предварительные высотные отметки в поле вывода результата. Так как технология фрезерования не предполагает сильного отличия формируемой поверхности от фактической, то в качестве предварительных высотных отметок может быть использована съемка фактической поверхности.

Использование эволюционного метода требует ввода дополнительных исходных данных, сильно влияющих на результат вычислений. Подбор этих данных производится опытным путем, что повышает трудоемкость решения.

С учетом всех факторов выбранный метод решения модели – ОПГ.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В MS EXCEL

Для проверки адекватности модели использована картограмма площадки, расположенной на объекте текущего ремонта УДС по адресу пересечение улиц Литовской и Грибалевой. Нивелирная съемка и прочие исходные данные указаны на Рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	**Поле ввода исходных данных**							
2	Таблица 1 - Исходные данные (результат съемки), м							
3	Индекс точки		1	2	3	4	5	6
4		X / Y	0	5	10	15	20	25
5	1	0	9,76	9,94	9,79	9,86	9,95	10,01
6	2	4	9,77	9,91	9,85	9,8	9,86	9,97
7	3	7	9,76	9,87	9,9	9,88	9,92	9,86
8	4	9,5	9,76	9,77	9,78	9,84	9,87	9,92
9								
10	Таблица 2 - Технологические характеристики процесса							
11	Толщина устраиваемого слоя а/б по проекту, см							4
12	Предпочтительная средняя глубина зарезания, см							2
13	Минимально допустимый уклон для обеспечения водоотвода, %:							0,5
14	Максимально допустимый уклон, %							3
15								
16	**Цветовое обозначение ячеек**							
17	Ввод данных на основании нивелирной съемки							
18	Ввод данных на основании разбивки на БЛ и поперечники							
19	Ввод значений технологических характеристик процесса							
20	Результаты расчета алгоритма							

Рис. 4. Исходные данные

Received: 09.05.2023 **Revised:** 09.06.2023 **Accepted:** 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена:** 09.06.2023 **Принята:** 30.06.2023

Результат расчета алгоритма приведен на Рис. 5 и 6.

Таблица 3 - Проектные отметки верха покрытия (результат расчетов), м

Индекс точки	X / Y	1	2	3	4	5	6
		0	5	10	15	20	25
1	0	9,760	9,910	9,890	9,888	9,969	10,029
2	4	9,770	9,920	9,870	9,868	9,893	9,991
3	7	9,760	9,845	9,855	9,853	9,945	9,933
4	9,5	9,760	9,770	9,780	9,840	9,870	9,920

Таблица 4 - Глубина зарезания, см

Индекс точки	X / Y	1	2	3	4	5	6
		0	5	10	15	20	25
1	0	4,000	7,000	-6,000	1,250	2,060	2,078
2	4	4,000	3,008	2,000	-2,750	0,750	1,894
3	7	4,000	6,500	8,500	6,750	1,500	-3,250
4	9,5	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

Рис. 5. Проектная поверхность и значения глубин зарезания

9,760	←	3,0	**9,910**	0,4	→	**9,890**	0,05	→	**9,888**	←	1,6	**9,969**	←	1,2	**10,029**
↑			↑			0,5			0,5			1,9			1,0
0,2			0,2			↓			↓			↓			↓
9,770	←	3,0	**9,920**	1,0	→	**9,870**	0,05	→	**9,868**	←	0,5	**9,893**	←	2,0	**9,991**
0,3			2,5			0,5			0,5			↑			2,0
↓			↓			↓			↓			1,8			↓
9,760	←	1,7	**9,845**	←	0,2	**9,855**	0,05	→	**9,853**	←	1,9	**9,945**	0,25	→	**9,933**
0,0			3,0			3,0			0,5			3,0			0,5
0,0			↓			↓			↓			↓			↓
9,760	←	0,2	**9,770**	←	0,2	**9,780**	←	1,2	**9,840**	←	0,6	**9,870**	←	1,0	**9,920**

Рис. 6. Проектная поверхность с обозначением величины уклонов и их направлением

Из Рис. 6 видно, что БЛ, формируемые алгоритмом, не всегда являются плавными. Но, в то же время, сгладить БЛ методами, предложенными в [4–6], не представляется возможным, так как в указанных работах один числовой ряд, а в данной статье обработке должны подвергаться несколько взаимосвязанных рядов. Для подбора оптимального коэффициента сглаживания каждой БЛ в отдельности и их соотношения между собой необходимо затратить большое количество

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

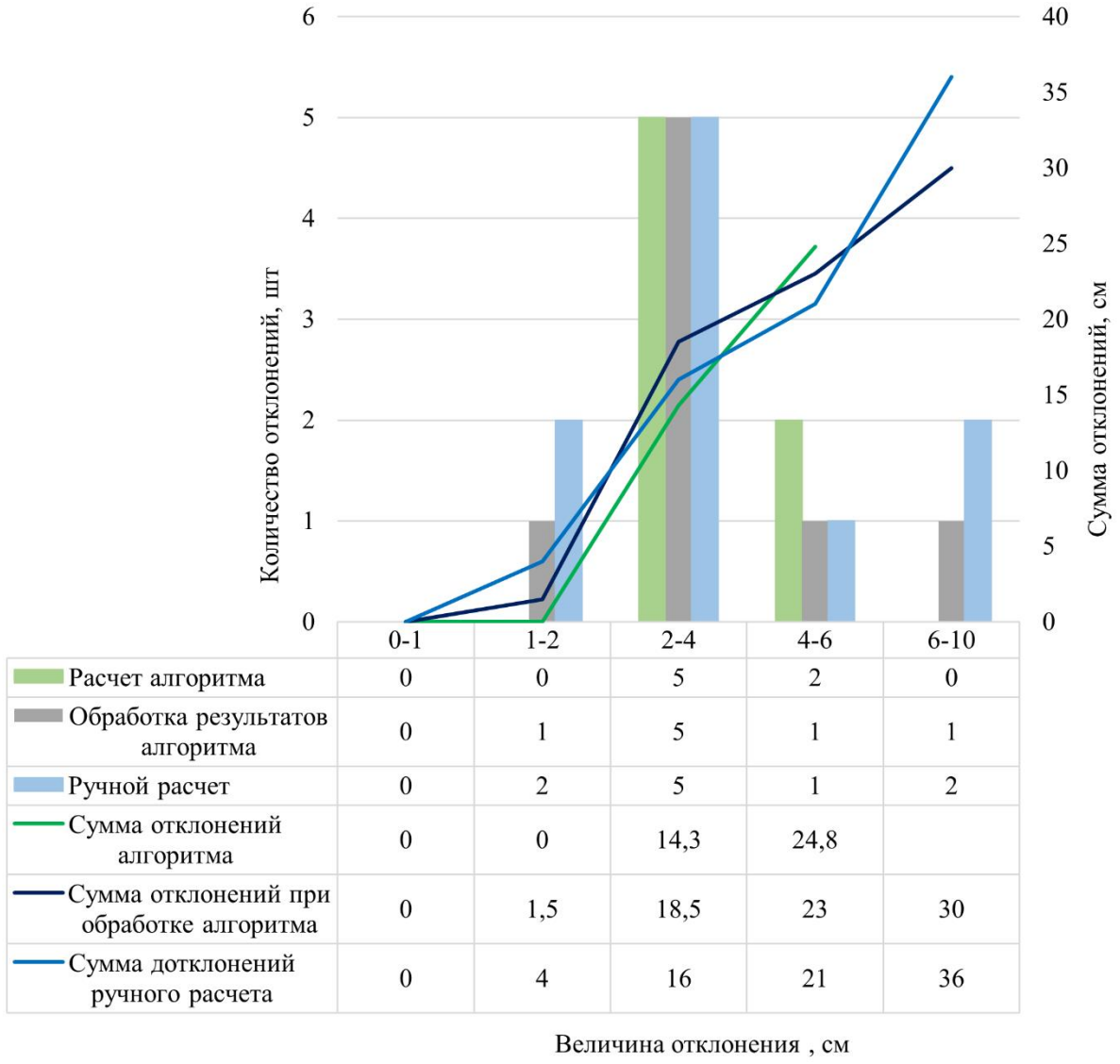
времени. В этой работе сглаживание полученных результатов предлагается проводить вручную после завершения работы алгоритма.

На Рис. 7 представлен график сопоставления результатов, полученных в ходе расчета, обработанных вручную после расчета и полученных полностью ручным способом.

Рис. 7. Графики сопоставления продольных профилей по БЛ №1-№3, полученных различными способами

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

На Рис. 8 представлены графики, отображающие частоту появления отклонений глубин зарезания от диапазона 0–4 см (4 см – толщина устраиваемого покрытия по проекту; выход глубины зарезания из данного диапазона ведет к перерасходу асфальтобетонной смеси).



	0-1	1-2	2-4	4-6	6-10
Расчет алгоритма	0	0	5	2	0
Обработка результатов алгоритма	0	1	5	1	1
Ручной расчет	0	2	5	1	2
Сумма отклонений алгоритма	0	0	14,3	24,8	
Сумма отклонений при обработке алгоритма	0	1,5	18,5	23	30
Сумма дотклонений ручного расчета	0	4	16	21	36

Рис. 8. Частота отклонений глубины реза от диапазона [0–4] см в зависимости от способа составления картограммы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье модель составления картограммы фрезерования работает в полуавтоматическом режиме: первоначальный результат расчетов стоит обрабатывать для получения более гладкой плоскости. Однако даже с учетом этого алгоритм ускоряет рабочий процесс – составление картограммы в полностью ручном режиме заняло 31 минуту, ввод данных в программу с последующей ручной корректировкой

Received: 09.05.2023
Поступил: 09.05.2023
Revised: 09.06.2023
Одобрена: 09.06.2023
Accepted: 30.06.2023
Принята: 30.06.2023

результата занял 12 минут. Объем сокращения рабочего времени в данном случае составил 61,3 %.

Из Рис. 7 видно, что после обработки результатов расчета, полученные продольные профили находятся в промежуточном положении между результатами расчета алгоритма и ручного расчета. Следовательно, результат работы алгоритма стоит воспринимать как наиболее выгодный с точки зрения глубин зарезания вариант картограммы, однако неровный и требующий дальнейшей обработки (Рис. 6, 7). Обработанные результаты расчета кардинальным образом не отличаются от предложенных алгоритмом, а значит, на этап обработки не требуется отводить значительное количество времени. Полностью ручной расчет требует от лица, решающего задачу, самостоятельно определить наиболее предпочтительные способы водоотвода и места расположения переломов профиля (линии лотков и водоразделов).

Из Рис. 8 следует, что при ручном расчете суммарное отклонение глубины зарезания наибольшее – 36 см. Суммарное отклонение при обработке результатов алгоритма составляет 30 см, что близко к среднеарифметическому значению результатов полностью ручного расчета и полностью автоматизированного (30,4 см), и на 16,7 % меньше, чем при ручном расчете. При ручном способе расчета отклонения распределяются наиболее равномерно, при автоматическом способе – наименее, т.к. алгоритм позволяет отклонение от диапазона только в местах, где это необходимо для соблюдения условий водоотвода.

Таким образом, полуавтоматическое построение картограммы с использованием приведенной модели представляет собой компромиссное решение, сочетающее в себе одновременно гладкость поверхности и минимизацию отклонений глубины реза от целевого диапазона и при этом экономящее время, необходимое для проведения подготовительных работ.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Васильев К.А., Бирюков О.Р., Алексеев С.В. Выбор способа устройства поперечного уклона проезжей части при ремонте автомобильной дороги / Материалы всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». 26–30 апреля 2021; СПб. ФГАОУ «СПбПУ», 2021. – С. 297–299. [Vasil'ev KA, Birjukov OR, Alekseev SV. Vybor sposoba ustrojstva poperechnogo uklona proezzhej chasti pri remonte avtomobil'noj dorogi. Materials of the All-Russian Conference “Nedelja nauki ISI”. 2021 Apr 26-30; St. Petersburg. FGAOU SPbPU, 2021. pp. 297-299. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294849 Ссылка активна на 29.04.2023.

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Закон Санкт-Петербурга №163-34 от 11 апреля 2013 г. «О порядке ремонта и содержания автомобильных дорог в Санкт-Петербурге (с изменениями на 18 марта 2020 года)» [Law of St. Petersburg № 163-34 of 11 April 2013. “O porjadke remonta i soderzhanija avtomobil'nyh dorog v Sankt-Peterburge (s izmenenijami na 18 marta 2020 goda)”. (In Russ.)]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: https://npa.gov.spb.ru/SpbGovSearch/Document/2079.html

3. Лебедева А.К. Моделирование систем методами линейного программирования / Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования». 18–23 апреля 2022 года; Краснодар. Краснодар: ФГБУ "РЭА" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2022. – С. 317–321. [Lebedeva AK. Modelirovanie sistem metodami linejnogo programmirovanija. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists “Prikladnaja matematika: sovremennye problemy matematiki, informatiki i modelirovanija”. 2022 Apr 18–23; Krasnodar. Krasnodar: FGBU "REA" Min`energo Rossii Krasnodarskij TsNTI – filial FGBU "REA" Min`energo Rossii 2022. pp. 317-321. (In Russ.)]. Ссылка активна на 29.04.2023. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49529423

4. Chew EP, Goh CJ, Fwa TF. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1989; 5(23): 315–329. doi: 10.1016/0191-2615(89)90008-8

5. Artun A, Radaev AE, Badenko VL. Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm. *Construction of unique buildings and structures*. 2019;7(82):7-13. doi: 10.18720/CUBS.82.1

6. Shewchuk J. An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain. 1994 Mar [cited 2023 Apr 29]. Available from: https://people.eecs.berkeley.edu/~jrs/papers/cg.pdf

7. Bertsekas D. P. Convex Optimization Theory. Belmont, Athena Scientific Publ., 2009. 444 p. [cited 2023 Apr 29]. Available from: http://web.mit.edu/dimitrib/www/Convex_Theory_Entire_Book.pdf

8. Нестеров Ю.Е. Методы выпуклой оптимизации. Москва: МЦНМО, 2007. [Nesterov JuE. *Metody vypukloj optimizatsii.* Moscow: MTsNMO, 2007. (In Russ)]. Доступно по: https://mipt.ru/dcam/upload/abb/nesterovfinal-arpgzk47dcy.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

9. Зайцев А.А., Курейчик В.В., Полупанов А.А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 7–12. [Zajtsev AA, Kurejchik VV, Polupanov AA. Obzorevoljutsionnyh metodov optimizatsii na osnove roevogo intellekta. *Izvestija JuFU. Engineering Sciences.* 2010;12(113):7-12. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15553703_33238503.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

10. Help and Documentation - MATLAB & Simulink. [Cited 2023 Apr 29]. Available from: https://www.mathworks.com/help/simulink

11. Справка и обучение по Excel. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: https://support.microsoft.com/en-us/excel

12. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.А., Рыков В.А. Методы оптимизации в примерах в пакете MATHCAD 15, Часть III Многомерная оптимизация. Аналитические методы. СПб: ИТМО, 2018. [Rykov SV, Kudrjavtseva IV, Rykov SA, Rykov VA. *Metody optimizatsii v primerah v pakete MATHCAD 15, Chast'*

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

III Mnogomernaja optimizatsija. Analiticheskie metody. St. Petersburg: ITMO, 2018. (In Russ.)]. Доступно по: https://books.ifmo.ru/file/pdf/2359.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

13. Хабарова Д.С. Обзор программных комплексов многокритериальной оптимизации // Прикладная информатика. – 2013. – № 2(44). – С. 102–112. [Habarova DS. Obzor programmnyh kompleksov mnogokriterialnoj optimizatsii. *Prikladnaja informatika*. 2013;2(44):102-112. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18946985_85841042.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.
14. Свод правил №396.1325800.2018 от 1 августа 2018 г. «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (с Изменениями N 1, 2)». [Body of rules №396.1325800.2018 of 1 August 2018. “Ulitsy i dorogi naselennyh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovanija (s Izmenenijami N 1, 2)”. (In Russ.)]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/81f/SP-396.pdf
15. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путевой навигатор. – 2022. – № 50(76). – С. 30–41. [Ermoshin NA, Romanchikov SA, Averianov DA. Imitatsionnoye modelirovaniye riska razrusheniya dorozhnykh konstruktsiy v mezhremontnyy period. *Putevoy navigator*. 2022;50(76):30-41. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48202390_88032815.pdf
16. Вавилов В.Е. Математическая модель гибридных систем магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 97–108. [Vavilov VE. Matematicheskaya model gibridnyh sistem magnitnoj levitacii energovyrabatyvayushchego oborudovaniya avtonomnyh sistem elektrosnabzheniya. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):97-108. (In Russ.)]. doi**:** 10.17816/transsyst20162397-108

Сведения об авторах:
Федосеев Никита Александрович, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Свальбова Вера Алексеевна, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN:7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN:6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Information about the authors:
Fedoseev A. Nikita, master’s degree student;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Svalbova A. Vera, master's degree student;
eLibrary SPIN:7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Alekseev V. Sergey, candidate of military sciences, associate professor,
eLibrary SPIN:6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Цитировать:
Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

To cite this article:
Fedoseev NA, Svalbova VA, Alekseev SV. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):66-82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 624.21
DOI 10.17816/transsyst20239283-96

© А.А. Махонько[1], А.В. Мальков[1], А.А. Белый[2], А.А. Антонюк[3]
[1]ООО «ОСА-Север»
[2]Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева
[3]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВАНТОВОГО МОСТА ЧЕРЕЗ ПЕТРОВСКИЙ КАНАЛ В СТВОРЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «ЗАПАДНЫЙ СКОРОСТНОЙ ДИАМЕТР» В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Цель: Анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» (ЗСД) в городе Санкт-Петербурге.

Материалы и методы: Для получения результатов используются статистические данные с баз данных действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения теоретических методов научного познания: аналитический метод, теория математической статистики, индукция.

Результаты: Представлен анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций с описанием одной из основных проблем – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом. Предложены пути решения сформированной проблемы, определена перспектива дальнейших исследований в части несовершенства систем мониторинга на внеклассных сооружениях.

Заключение: Полученные результаты исследования можно использовать при проектировании и устройстве систем мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах, а также при модернизации и оптимизации действующих систем мониторинга для улучшения качества оценки технического состояния конструкций.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений; управление техническим состояние; объект транспортной инфраструктуры; вантовый мост; напряженно-деформированное состояние.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.A. Makhonko[1], A.V. Malkov[1], A.A. Belyi[2], A.A. Antonyuk[3]
[1]Highway Operator Nord, LLC
[2]Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov
[3]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

EXPERIENCE OF OPERATION MONITORING SYSTEM OF THE CAT-BONE BRIDGE THROUGH THE PETROVSKAYA CHANNEL IN THE ALIGNMENT OF THE WESTERN SPEED DIAMETER HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Aim: Analysis of the current monitoring system of the engineering structures of a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg.

Methods and Materials: Statistical data from the databases of the existing system of monitoring engineering structures is used to obtain the results. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying the theoretical methods of scientific knowledge: the analytical method, the mathematical statistics theory, induction.

Results: Analysis of the current monitoring system of engineering structures is presented with a description of one of the main problems – the impossibility of synchronizing readings from all sensors during considered period of time, which leads to the inability to correctly assess the stress-strain state of the bridge structure as a whole. Discovered problem solutions are proposed, further research prospect is determined in part of the imperfection of monitoring systems for long-span facilities.

Conclusion: The obtained study results can be used in designing and installation of monitoring systems of the engineering structures for cable-stayed bridges, as well as for modernization and optimization of existing monitoring systems to improve the quality of assessing technical condition of structures assessment.

Key words: structural artificial monitoring; technical condition management; transport infrastructure object; cable-stayed bridge; stressed-deformed condition.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях использование систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) является важным компонентом жизненного цикла внеклассных мостовых сооружений.

Применение СМИК является обязательным для обеспечения требуемого уровня безопасности в рамках действующей нормативной базы, в том числе для снижения риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде [1–3].

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Система мониторинга инженерных конструкций представляет собой технологию информационного обеспечения принятия решений по управлению параметрами состояния мостового сооружения на всех стадиях жизненного цикла, реализуемых посредством систематического или периодического слежения (наблюдения) за техническим состоянием конструкций [4–6].

К основным задачам систем мониторинга необходимо отнести:

1. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всего сооружения с учетом имеющихся дефектов и повреждений [7, 8];
2. Анализ и оценка степени влияния внешних воздействий на несущую способность в рассматриваемый момент времени и на прогнозируемый период;
3. Прогнозирование долговечности сооружения с учетом внешних воздействий и происходящих процессах деградации;
4. Разработка стратегий по восстановлению или улучшению потребительских свойств на действующих или проектируемых сооружениях [9, 10].

При использовании действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в Санкт-Петербурге авторами были выделены несколько проблем, влияющие на качество оценки технического состояния мостового сооружения.

В данной статье авторами будет рассмотрена одна из основных проблем в действующей системе мониторинга – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Согласно ГОСТ Р 59943-2021 в качестве объектов мониторинга необходимо рассматривать мостовые сооружения, имеющие длину одного из пролетов более 100 м или высотой опор более 15 м. В связи с этим устройство СМИК рассматриваемого моста является обязательным условием при эксплуатации сооружения [11, 12].

При мониторинге конструкций вантового моста предусматривается определение необходимых параметров для анализа напряженно-деформированного состояния различных элементов сооружения. Мониторингу подлежат элементы моста, подверженные наибольшим нагрузкам и изменениям состояния в процессе эксплуатации: опоры, пилоны, вантовая система, пролетное строение [13].

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Основными параметрами, которые определяются в процессе мониторинга являются: абсолютные и относительные смещения конструкций; динамические показатели, влияющие на износ конструкций; натяжение вантовой системы; напряженно-деформированное состояние пролетного строения [14, 15].

На Рис. 1 представлена схема расположения датчиков СМИК на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

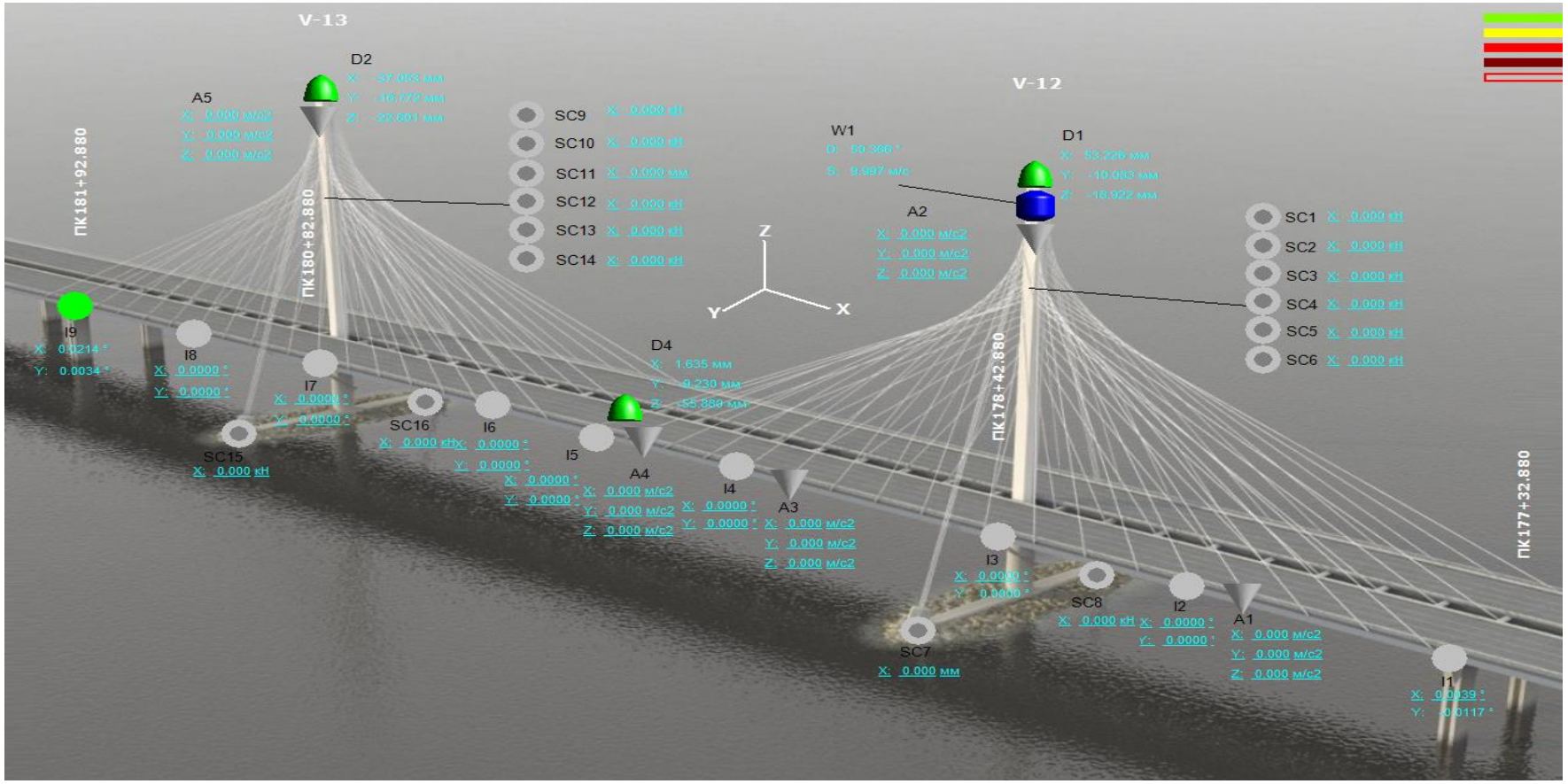


Рис. 1. Схема расположения датчиков системы мониторинга инженерных конструкций

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Установленную систему мониторинга инженерных конструкций можно разделить на подсистемы, которые представлены на Рис. 2.

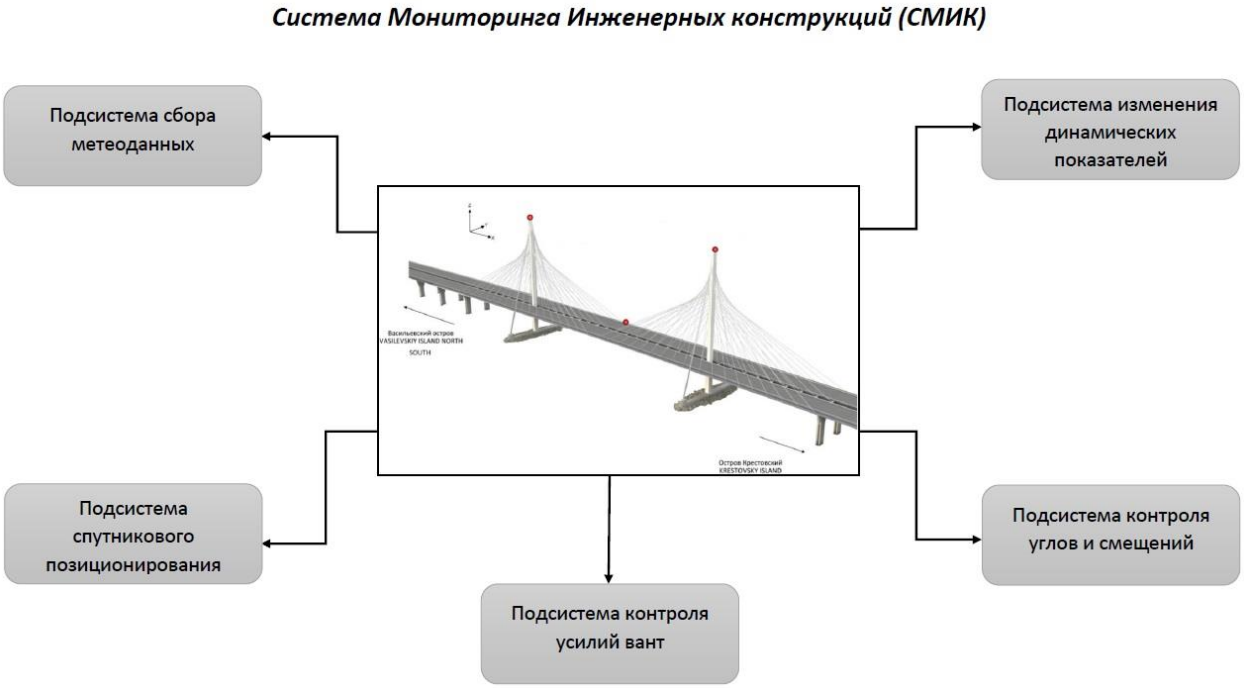


Рис. 2. Схема системы мониторинга инженерных конструкций

В каждой подсистеме находится элемент мостового сооружения, на который устанавливается датчик или группа датчиков. В Табл. 1 представлены зоны контроля и количество установленных датчиков, распределенных по подсистемам СМИК.

Таблица 1. Зоны контроля, подсистемы и количество датчиков

№ п/п	Наименование подсистемы СМИК	Элементы моста, подлежащие мониторингу	Датчики, установленные на элементы моста
1.	Подсистема контроля усилия вант	Вантовая система	Датчик усилия вант (16 шт)
2.	Подсистема изменения динамических показателей	Пилоны; Пролетные строения	Акселерометр (5 шт)
3.	Подсистема контроля углов и смещений	Промежуточные опоры; пролетные строения	Инклинометр (9 шт)
4.	Подсистема спутникового позиционирования	Пилоны; пролетное строение	GPS-станция (3 шт)
5.	Подсистема сбора метеоданных	Пилон	Анеморумбометр (1 шт)

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Далее приведем принцип работы каждой подсистемы с описанием датчиков, входящих в нее.

В подсистеме контроля усилия вант используются датчики усилия, которые установлены на самые нагруженные ванты. Датчики измеряют деформацию в стренде, после чего происходит перерасчет в усилия натяжения. Диапазон измерений составляет от 0 до 240 кН с частотой сбора данных равной 1 Гц. Измерения производятся продолжительностью в 30 минут, после чего определяется среднее значение на данном временном интервале с последующим построением графика изменения усилий в каждой ванте.

На Рис. 3 представлен график изменения усилия нескольких стрендов вант за сутки.

Подсистема изменения динамических показателей выдает динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений колебаний при помощи акселерометров. Акселерометры расположены в точках, наиболее податливых к динамическим воздействиям: верхняя точка пилонов, середина и четверть пролетных строений. Датчик измеряет в двух направлениях (X и Y) с регулируемой частотой дискретизации от 0 до 160 Гц при диапазоне изменений +/-3g. Измерения производятся продолжительностью 30 минут, после чего определяется максимальное значение, которое отображается на графике.

При возникновении ситуации, когда датчик фиксирует значения, превышающие предельные, запись показаний производится с частотой 50 Гц с временным интервалом в 10 минут.

На Рис. 4 показан график изменения ускорений колебаний пилона при значениях, превышающих предельные.

В подсистеме контроля углов и смещений используются одноосевые гравитационно-ориентированные инклинометры, расположенные на промежуточных опорах и пролетных строениях, в местах наиболее подверженных деформации кручения: середина и четверть пролета. Инклинометры смонтированы на уровне проезжей части и измеряют угол поворота в направлении перпендикулярном оси моста. Диапазон измерений +/-5° с частотой сбора данных 1 Гц. Измерения производится в 30-ти минутный интервал времени с последующим получением среднего значения, которые отображается на графике.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

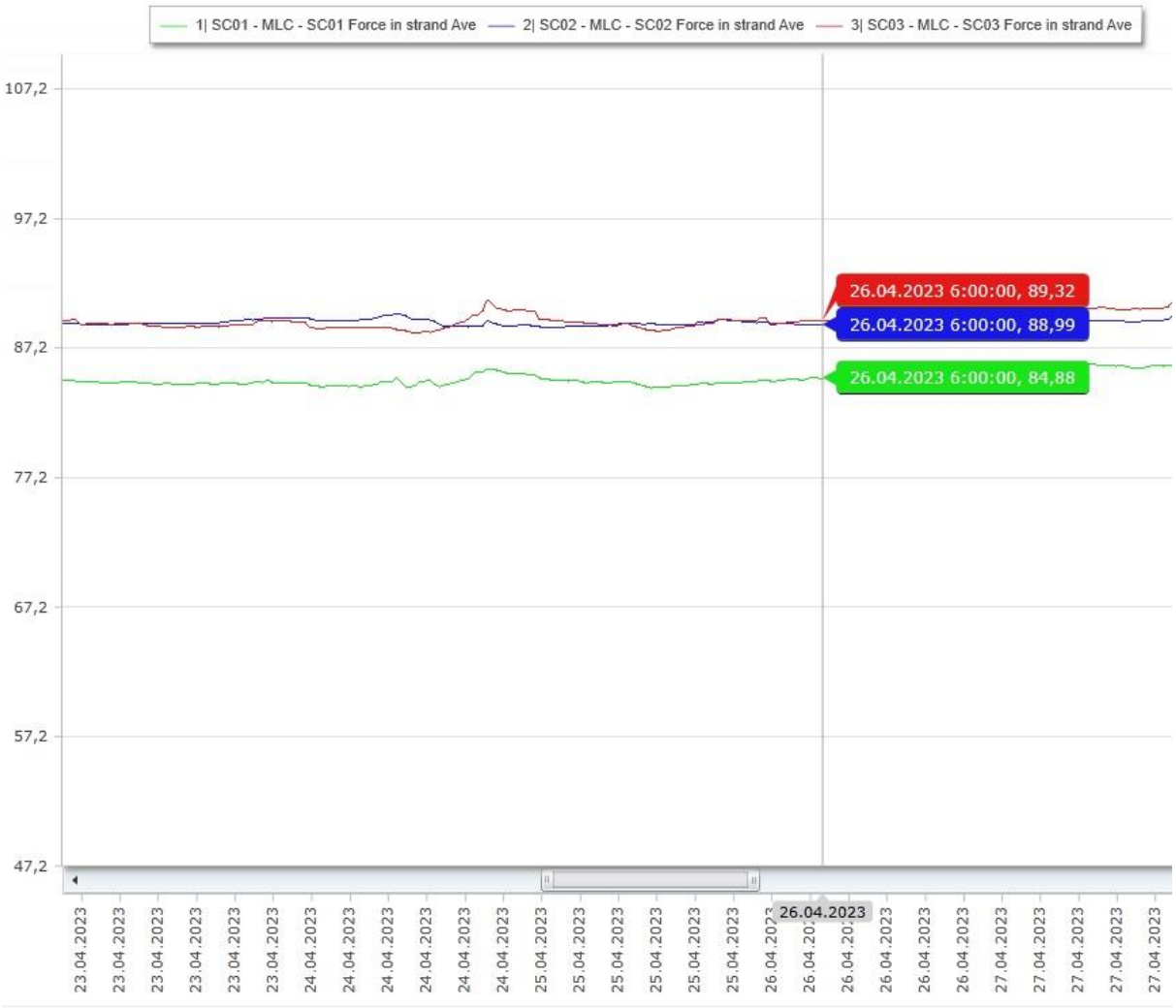


Рис. 3. График изменения усилий в стендах вант

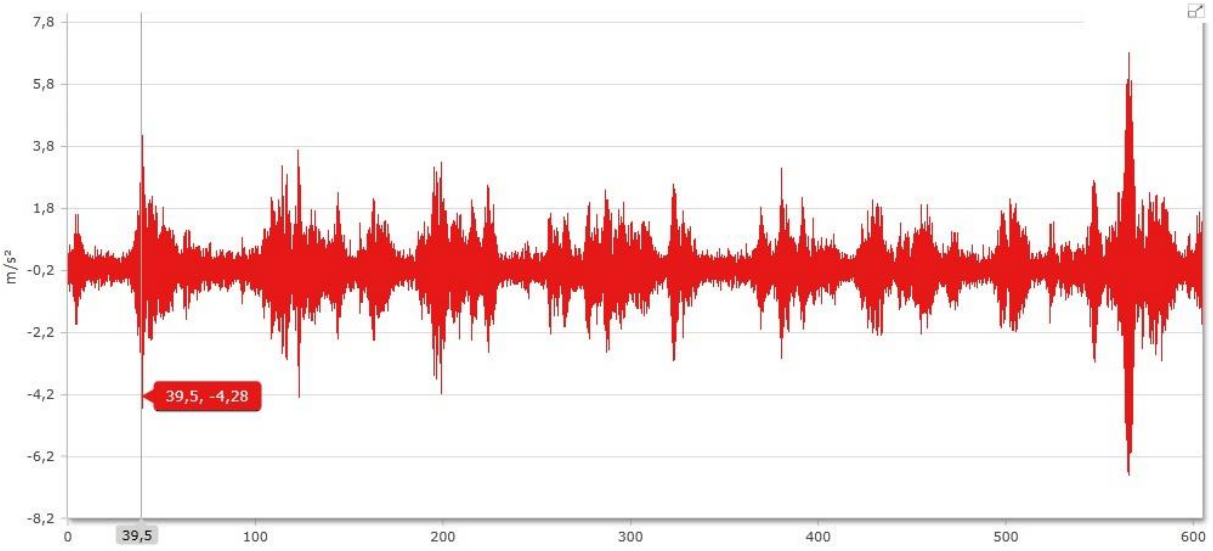


Рис. 4. График изменения ускорений колебаний на пилоне
при превышении предельных значений

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

На Рис. 5 показан график изменения углов поворота в середине и четвертях пролетного строения.

Для работы подсистемы спутникового позиционирования используются спутниковые приемники, принимающие радиосигналы от спутниковых навигационных систем ГЛОНАС и GPS. Данные спутниковые приемники используются для наблюдения за смещением критических точек, которыми являются верхние точки пилонов и середина пролетного строения. Точность зависит от различных факторов, таких как количество отслеживаемых спутников, геометрия созвездия, время наблюдения, точность эфемерид, ионосферные возмущений. Частота позиционирования составляет 1 Гц с количеством каналов равным 120. Измерения осуществляются по трем координатам (X, Y, Z) в 30-ти минутном интервале с последующим определением среднего значения по каждому из направлений.

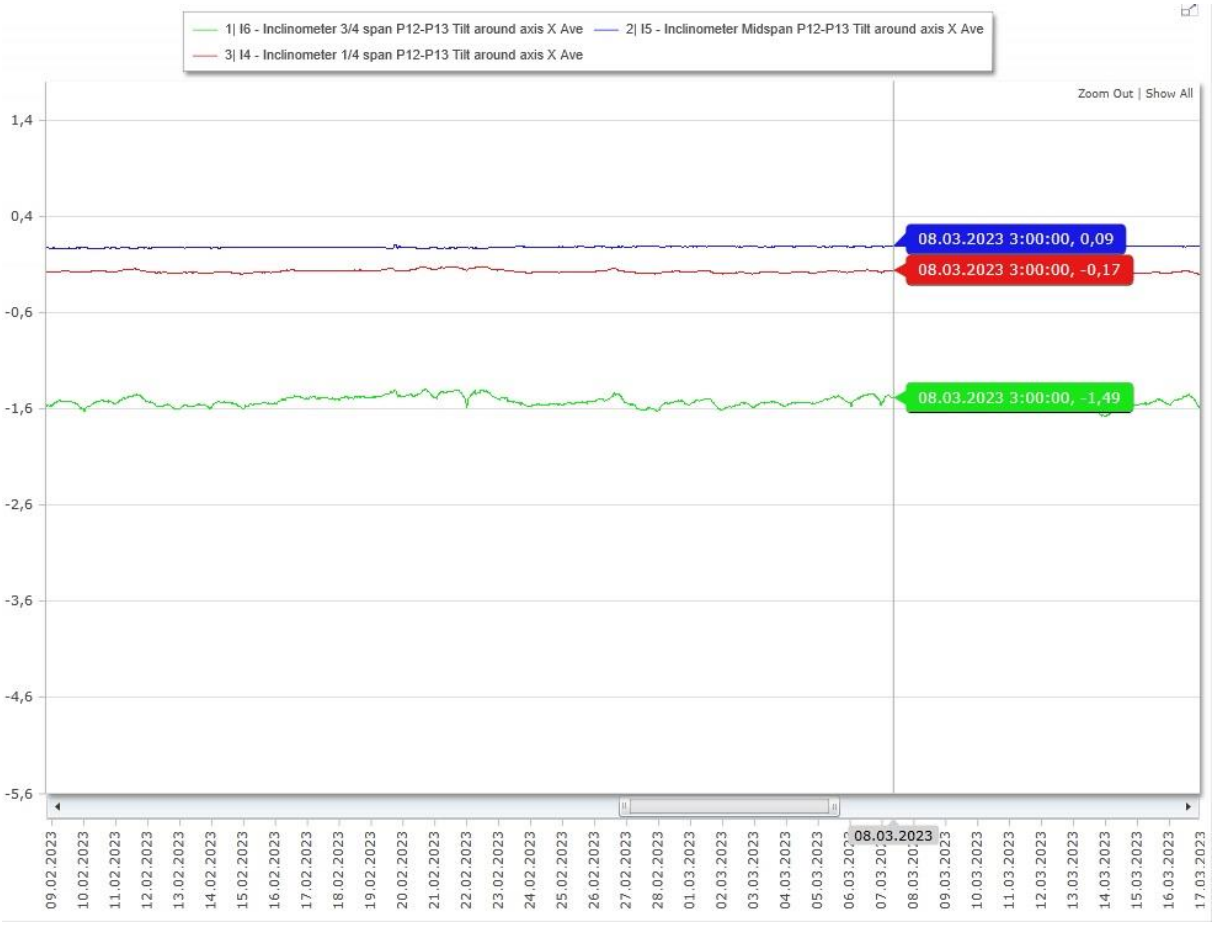


Рис. 5. График изменения углов поворота пролетного строения

На Рис. 6 представлен график с GPS-станции, установленной на пилоне по трем направлениям измерения.

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Для работы подсистемы сбора метеоданных используется анеморумбометр, который позволяет измерить скорость и направление ветра. Диапазон измерения скорости составляет от 0 до 60 м/с. Устанавливается прибор на верхней точке пилона. Измерения осуществляются в аналогичном временном интервале с частотой сбора данных 1 Гц. Анеморумбометр позволяет получать максимальные, минимальные и средние значения.

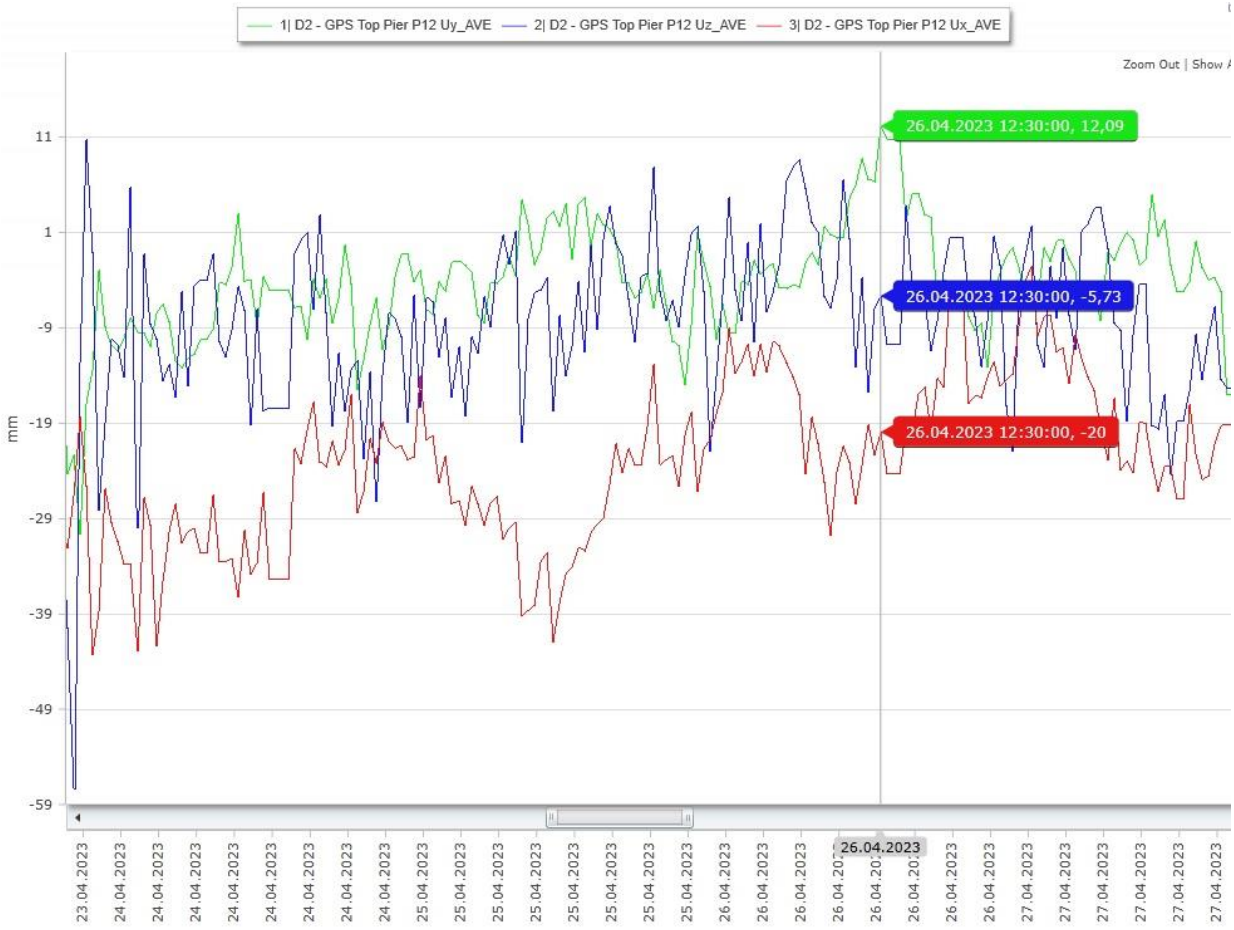


Рис. 6. График изменения смещений верхней точки пилона по трем направлениям

На Рис. 7 показан график изменения средней скорости и среднего направления ветра.

В Табл. 2 приведена сводная ведомость по датчикам, в которой основным параметром следует рассмотреть частоту выходных данных, полученную после анализа СМИК.

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

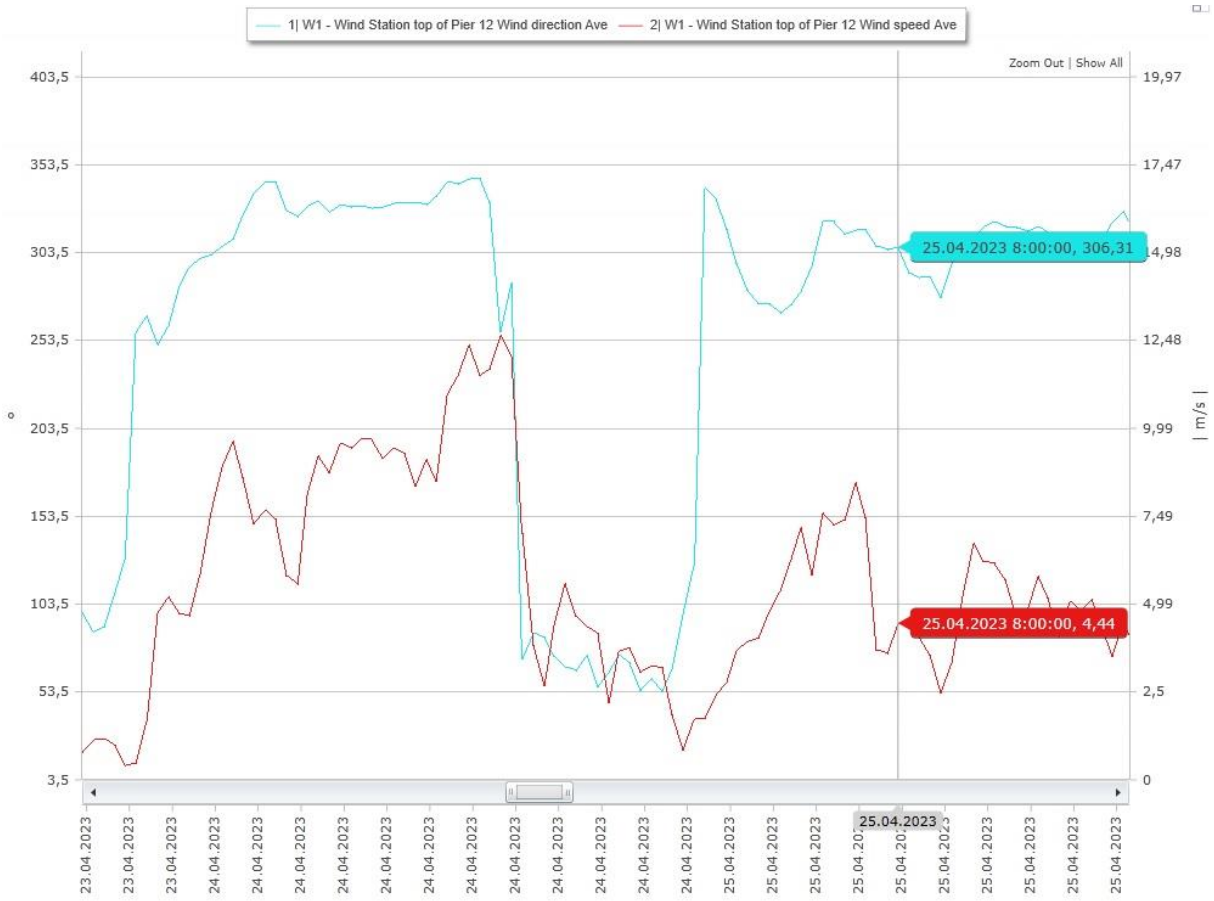


Рис. 7. График изменения средней скорости ветра и среднего направления ветра

Таблица 2. Характеристики датчиков

№ п/п	Наименование датчика	Единицы измерения датчиков	Частота выходных данных, Гц	Временной интервал выходных данных, мин
1.	Датчик усилия вант	кН	0,0005	30
2.	Акселерометр	м/с^2	0,0005/50	30/10
3.	Инклинометр	°	0,0005	30
4.	GPS-станция	мм	0,0005	30
5.	Анеморумбометр	м/с, °	0,0005	30

Из Табл. 2. видно, что частота выходных данных акселерометра имеет значительное превышение в 50 Гц в момент фиксирования значений, превышающих предельные.

В момент фиксирования значений акселерометром, превышающих предельные, другие датчики продолжают выдавать усредненные значения с низкой частотой в 0,0005 Гц, что приводит к невозможности синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Также из анализа результирующих графиков измерений, представленных на Рис. 3–7, учитывая саму цель устройства СМИК, можно констатировать, что каждый измеряемый параметр и временные диапазоны его записи отличны друг от друга, что не позволяет корректно определить причины возникновения нештатных ситуаций, произвести оценку рисков и своевременно принять соответствующие решения в режиме реального времени для недопущения возникновения аварийных ситуаций.

Исходя из выше сказанного следует, что при существующей системе мониторинга возможно производить анализ только отдельных усредненных параметров напряженно-деформированного состояния сооружения, что не позволяет давать корректную оценку об общем техническом состоянии всего мостового сооружения.

ВЫВОДЫ

Авторами статьи проанализирована работа действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

Для решения найденной проблемы предлагается:

1. Внести в нормативную документацию рекомендации про необходимость учета синхронизации датчиков в определенный период времени при достижении предельных значений на одном из датчиков системы мониторинга на момент составления проекта СМИК;

2. Произвести оптимизацию системы, при которой получится синхронизировать работу датчиков СМИК в момент фиксации одним из датчиков значений, превышающих предельные, путем единовременной записи соответствующих значений с каждого датчика с максимально возможной частотой.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. ГОСТ Р 59943-2021. Дороги общего пользования. Системы мониторинга мостовых сооружений. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 19 с. [State Standard 59943-2021. Automobile roads of general use. Systems of monitoring bridges. Design rules. Moscow: FGBU “RST”; 2022. 19 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://docs.cntd.ru/document/1200182099

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 120 с. [Vasil'ev AI. Monitoring tehnicheskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij: uchebnoe posobie. Moscow: MADI; 2021. 120 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf

3. Карапетов Э.С., Белый А.А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век». – 2008. – № 4. – С. 80–83. [Karapetov JeS, Belyj AA. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy. *Vestnik "Zodchij. 21 vek"*. 2008;4;80-83. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://elibrary.ru/download/elibrary_13051187_35424783.pdf

4. Васильев А.И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы // Дорожная держава. – 2008. – № 11. – С. 80–82. [Vasil'ev AI. Monitoring mostovyh sooruzhenij. Zadachi, vozmozhnosti, problem. *Dorozhnaja derzhava*. 2008;(11):80-82. (In Russ.)].

5. Иванов Ю.С., Снежков И.И., Чаплин И.В., Яшнов А.Н. Автоматизация процесса определения усилия в вантовых элементах мостов по частотам собственных колебаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 18–25. [Ivanov YS, Snezhkov II, Shaplin IV, Yashnov AN. Automation Process of Determining the Force in the Cable Elements of Bridges Over Own Frequencies of Vibrations. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2017;4;18-25. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-opredeleniya-usiliya-v-vantovyh-elementah-mostov-po-chastotam-sobstvennyh-kolebaniy/viewer

6. Яшнов А.Н., Баранов Т.М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 – С. 199–209. [Yashnov AN, Baranov TM. Monitoring of Dynamic Behavior of Bridge Across the Angara in Irkutsk. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building.* 2017;(1):199-209. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285

7. Belyi A, Osadchy G, Dolinskiy K. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures. In: Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018); 2018 Sept 14–17; Kazan, Russia; 2018. pp. 176-183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743

8. Брынь М.Я., Никитчин А.А., Толстов Е.Г. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29) – С. 58–60. [Bryn MYa, Nikitchin AA, Tolstov EG. Geodesic monitoring of railway transport infrastructure objects. *Transport Rossijskoj Federacii.* 2010;4(29):58-60. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://cyberleninka.ru/article/n/geodezicheskiy-monitoring-obektov-infrastruktury-zheleznodorozhnogo-transporta-sputnikovymi-metodami/viewer

9. Брынь М.Я., Толстов Е.Г., Никитчин А.А., и др. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 2(19) – С. 120–128. [Bryn MYa, Tolstov EG, Nikitchin AA, et al. Geodetic Monitoring of Cable-Stayed Bridge Deformation on the Basis of GNSS Technologies. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2009;2(19):120-128. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/02_2009.pdf

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

10. Белый А.А., Ященко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. – 2020. – № 45(71) – С. 38–45. [Belyi AA, Belov AA, Jashhenko AI, Antonyuk AA. Integralny monitoring mosta Aleksandra Nevskogo. *Putevoi navigator*. 2020;45(71):38-45. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://www.dropbox.com/s/m109hciiixjfx8g/pn-45-2020.pdf?dl=0

11. Гарамов О.В. Длительный приборный мониторинг автодорожных мостов. Проблемы и перспективы // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 27–31. [Garamov OV. Dlitel'nyi pribornyi monitoring avtodorozhnykh mostov. Problemy i perspektivy. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2004;1:27-31 (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/01_2004.pdf

12. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 34–38. [Syrkov AV. Puti razvitija avtomatizirovannyh sistem jekspluatacii i soderzhanija avtodorozhnyh iskusstvennyh sooruzhenij. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2014;2:34-38. (In Russ.)].

13. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (монография). СПб: ПГУПС, 2016. [Efanov DV. *Funkcionalniy kontroli monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki* (monograph). St. Petersburg: PGUPS; 2016. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://istina.msu.ru/publications/book/182610023/

14. Сырков А.В., Крутиков О.В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 9. – С. 45–50. [Syrkov AV, Krutikov OV. Optimizacija zhiznennogo cikla mosta na ostrov Russkij vo Vladivostoke sredstvami analiza riskov i monitoring. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2012;9:45-50. (In Russ.)].

15. Белый А.А., Белов А.А., Осадчик Г.В., Долинский К.Ю. Автоматизация процесса управления техническим состоянием искусственных сооружений Санкт-Петербурга за счет применения средств инструментального мониторинга // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 380–406. [Automation of technical condition management process of St. Petersburg artificial constructions with the usage of structural health monitoring tools. *Automation on Transport*. 2018;4(3):380-406. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://atjournal.ru/ru/Home/Download?path=articles%2F2018_Vol.4_No.3_5_beliy.pdf

Сведения об авторах:
Махонько Андрей Андреевич, Инженер отдела дорожного надзора;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Мальков Алексей Васильевич, начальник дорожно-эксплуатационной службы;
eLibrary SPIN:0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;
E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru
Белый Андрей Анатольевич; к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;
E-mail: andbeliy@mail.ru
Антонюк Анатолий Анатольевич, инженер-исследователь;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Information about the authors:
Andrey A. Makhonko, quality control engineer;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Aleksey V. Malkov, head of the road maintenance service;
eLibrary SPIN:0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;
E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru
Andrey A. Belyi; Candidate of Technical Sciences, Assistant professor;
eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;
E-mail: andbeliy@mail.ru
Anatoly A. Antonyuk, engineer;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Цитировать:
Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 83–96. doi: 10.17816/transsyst20239283-96

To cite this article:
Makhonko AA, Malkov AV, Belyi AA, Antonyuk AA. Experience in operating the monitoring system for a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):83-96. doi: 10.17816/transsyst20239283-96

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 33:656.2
DOI 10.17816/transsyst20239297-109

© Н.А. Журавлева, В.А. Печкуров
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЫНКА ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН В РОССИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КОМПАНИЙ ОПЕРАТОРОВ

Обоснование: Нефть и нефтепродукты до сих пор являются основными статьями российского бюджета. И на рынке железнодорожных перевозок этот сегмент грузов является доминирующим. В ближайшие годы его исследование не потеряет своей актуальности. Постоянно возникающий дефицит вагонов – нефтебензиновых цистерн, ограничивает продажи сырья и продуктов его переработки, ведет к росту стоимости перевозки.

Цель: количественная оценка дефицита вагонов-цистерн для перевозки нефти и нефтепродуктов и разработка оптимальной операционной модели деятельности компании оператора.

Методы: данными для исследования являются статистические выборки показателей рынка перевозок нефти и нефтепродуктов за период с 2020 года по настоящее время, показатели эффективности использования подвижного состава компаний операторов. Исследование построено на методах статистического анализа рынка перевозок нефти и нефтепродуктов, факторного анализа зависимостей объемов грузов, предъявляемых к перевозке, объемов перевозок и состояния вагонного парка компаний операторов.

Результаты: проанализирован структурированный анализ рынка парка вагонов – цистерн в РФ, разработана операционная модель компании оператора с полным комплексом логистических решений по перевозке нефти и нефтепродуктов, реализуемая на основе эффективного использования парка подвижного состава.

Заключение: даны рекомендации по оптимизации операционных затрат на содержание подвижного состава компаний-операторов с учетом поддержания его в надлежащем технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасность движения и рост показателей эффективности перевозки железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: рынок перевозки нефти и нефтепродуктов, вагоны-нефтебензиновые цистерны, операционная модель оператора.

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva, V.A. Pechkurov
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF THE TANK CAR MARKET IN RUSSIA AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODELS OF OPERATOR COMPANIES

Background: Oil and petroleum products are still the main items of the Russian budget. This segment of cargoes is dominating in the railway transportation market. In the coming years, the study of this segment will not lose its relevance. Constantly arising shortage of wagons - petroleum tank cars, restricts sales of raw materials and products of their processing, leads to growth of transportation costs.

Aim: The major goal is to quantify the shortage of tank cars for oil and petroleum products transportation and to develop an optimal operating model for the operator's company.

Methods: The research data are statistical samples of oil and petroleum products transportation market indicators for the period from 2020 to the present, the indicators of efficiency of the rolling stock use by the operator companies. The research is built on the methods of statistical analysis of the market of oil and petroleum products transportation, factor analysis of dependences of the cargo volumes presented for transportation, the volume of transportation and the condition of the car fleet of operator companies.

Results: The structured analysis of the tank car market in the Russian Federation is analyzed, and the operating model of the operator company with a full complex of logistic solutions for oil and petroleum products transportation, realized on the basis of the efficient use of the rolling stock fleet, is developed.

Conclusion: Recommendations on optimizing operating costs for the maintenance of the rolling stock of operating companies, taking into account its maintenance in proper technical condition, ensuring traffic safety and increasing the efficiency of transportation by rail are given.

Key words: oil and petroleum products transportation market, petroleum tank cars, operator's operating model.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы рынка железнодорожных грузовых перевозок отражают в полной мере процессы нестабильности товарных рынков. Их исследования всегда в центре внимания научного экономического сообщества на транспорте [1]. Рынок услуг по перевозке нефти и нефтепродуктов РФ представлен транспортно-логистическими компаниями – операторами вагонов (нефтебензиновые цистерны). В первом квартале 2023 года 193 собственника цистерн владели 99 % парка России. В целом, из 600

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

компаний, операторов железнодорожного подвижного состава (оперирование всеми видами вагонов: цистерны, цементовозы, хопперы, зерновозы, фитинговые платформы, автомобилевозы и пр.) только 30 перевозят 80,8 % грузов, на их долю приходится 77,2 % парка в собственности, с учетом финансового лизинга и в управлении. Рынок достаточно высоко монополизирован, что дает нам основание при исследовании нескольких операторских компаний, делать обобщение в отношении данного сегмента рынка перевозок РФ.

Основными операторами на рынке перевозки нефтепродуктов, являются ООО «Трансойл» (31,41 тыс. единиц), АО «Первая грузовая компания» (30,3 тыс. единиц), ОАО «СГ-транс» (19,75 тыс. единиц), ООО «Газпромтранс» (16,66 тыс. единиц), ЗАО «СИБУР-Транс» (16,07 тыс. единиц), ЗАО «НефтеТрансСервис» (15,89 тыс. единиц) [2]. Несмотря на сокращение погрузки нефти и нефтепродуктов – на 0,7 % до 216 млн. т., дефицит вагонов сохраняется. Кроме этого, деятельность всех операторов ограничивается загруженностью железнодорожной инфраструктуры, особенно это стало критичным в условиях изменений маршрутов перевозок последнего года, переориентации логистических потоков на восток и увеличения среднего расстояния перевозки, что потребовало расширения спектра предоставляемых услуг. Операторы превращаются в транспортно-логистические компании с широким спектром услуг по планированию и организации перевозки, комплексному транспортно-логистическому обслуживанию, администрированию интересов клиентов и организации расчетов, обеспечению безопасности и правил перевозки грузов.

Текущая ситуация на рынке нефти и нефтепродуктов, в первую очередь, рост тарифов на перевозку, заставляет грузовладельцев оптимизировать свои расходы, что в свою очередь требует повышения эффективности операционных моделей перевозчиков. Только расширения линейки сервисов недостаточно, чтобы предложить грузовладельцу нужный ему продукт по перевозке. Проблема оптимизации подвижного состава – вагонов-цистерн остается острейшей.

В данном исследовании предложен подход к решению проблемы роста операционной эффективности компании-оператора на основе рационального использования его подвижного состава.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В основе исследования лежат данные о состоянии и тенденциях рынка нефти и нефтепродуктов, определяющие потребность в настоящих и будущих перевозках. Основная масса добываемой нефти транспортируется трубопроводами (более 90 %), а вот продукты нефтепереработки (бензин,

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

дизельное топливо, БГС и другое), как правило, перевозятся железнодорожном транспортом (около 70 %).

Так, несмотря на кризисные явления последних лет, Россия остается в тройке мировых лидеров по объемам добычи нефти. В 2021 году РФ осталась на втором месте в мире по объему добычи нефти – 524,05 млн. тонн, по сравнению с 2020 годом уровень добычи повысился на 2,2 % [3]. По данным Минэнерго, добыча нефти в первом полугодии 2022 г. выросла на 3,4 % выше показателя добычи аналогичного периода предыдущего года, что отражают показатели погрузки на сети железных дорог [4] (Рис. 1).

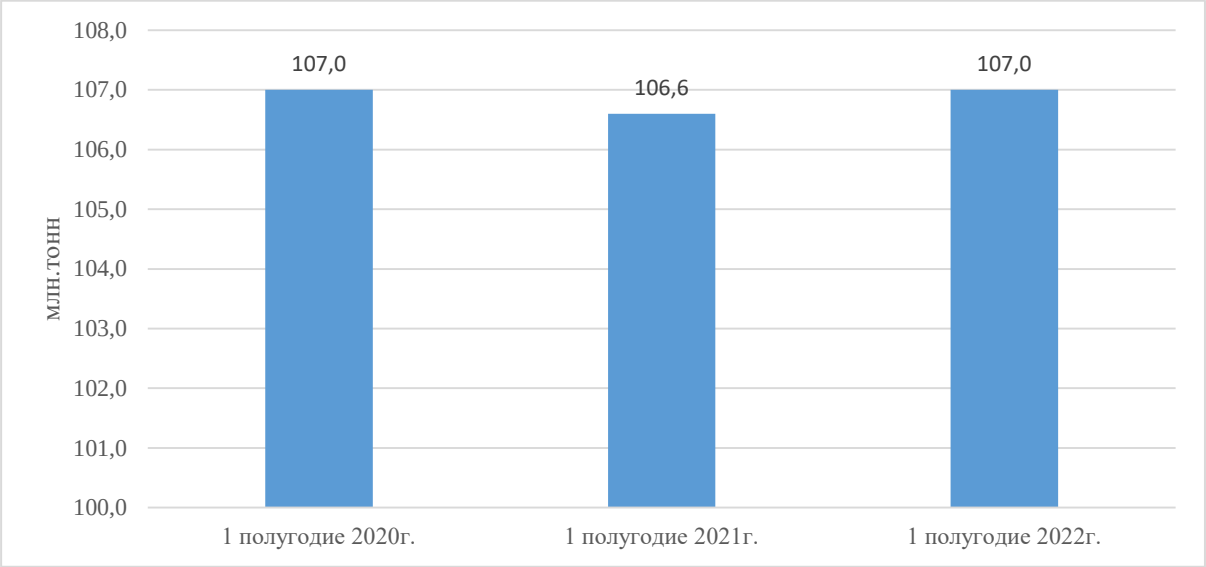


Рис. 1. Погрузка нефти и нефтепродуктов по сети РЖД в первом полугодии 2022г. в сравнении с 2021 и 2020 гг., млн. тонн.

Источник: расчеты авторов на основе данных [5]

Анализ показывает, что на данный сегмент рынка ни глобальные экономические и политические события, ни пандемия коронавируса Covid-19, практически не повлияли.

В анализе исследованы: динамика роста железнодорожных грузовых тарифов на перевозку грузов данного класса (14,8 % в год); показатели эффективности деятельности компаний – операторов (общий объем грузов, перевезенный за год в одном вагоне, отношение выручки к количеству парка в управлении и к общему объему перевозок грузов, грузооборот, объем перевозок, структура парка, средний возраст подвижного состава, динамика списания и закупок вагонного парка) [6].

Исследование построено на методе статистического анализа погрузки нефтепродуктов за период 2020–2022 гг.; общего и рабочего

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

парка цистерн за период 2021–2022 гг.; структуры парка грузовых вагонов за период 2019–2022 г.; состояния и прогноза закупок и списания вагонов за период 2018–2024 г. Использован факторный анализ причинно-следственных связей, влияющих на эффективное использование подвижного состава операторами железнодорожного транспорта.

В исследовании учтено, что вагонами-цистернами перевозятся и другие продукты, например, сжиженные углеводородные газы (далее СУГ), что требует наличия специализированного подвижного состава в надлежащем для перевозки состоянии [7].

Поскольку организация железнодорожной транспортной логистики и ограниченность инфраструктуры являются важнейшими факторами влияния на эффективность операционных моделей операторов, нами учтены показатели Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ состояния рынка перевозок нефти и нефтепродуктов и оценка потребности в их перевозке железнодорожным транспортом.

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте – это совокупность организационно и технологически взаимосвязанных операций, выполняемых при подготовке, осуществлении и завершении перевозок пассажиров, грузов, багажа и грузобагажа [8]. Его основу составляют железнодорожная инфраструктура, подвижной состав и вагоны. Вагонная составляющая перевозки формирует бизнес-модель компаний-операторов. Эффективный вагон с точки зрения операторского бизнеса – это вагон, генерирующий максимальную доходность при наименьших затратах на его функционирование. Замена парка новыми инновационными вагонами ведет как к снижению операционных затрат, так и к существенному росту капитальных затрат, но при этом обеспечивает рост эффективности их бизнес-моделей. В связи с этим компании-операторы из года в год увеличивают объемы закупок инновационного подвижного состава. Так, к концу 2022 года, доля инновационных вагонов составляет 53 % от общего объема против 41 % в 2018 году (Рис. 2).

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

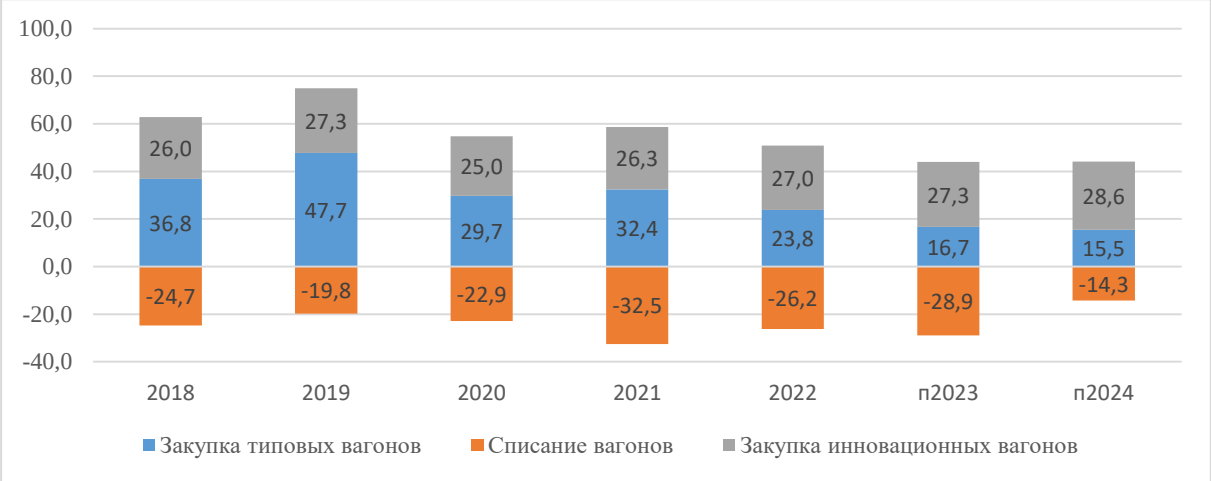


Рис. 2. Прогноз закупок и списания вагонов до 2024 г., тыс. ед.

Источник: расчеты авторов на основе данных [9].

Оптимизация затрат на поддержание парка вагонов в надлежащем технически исправном состоянии, соответствующем требованиям безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, является важнейшей проблемой эффективности деятельности операторов.

Проведенный анализ показывает, что объем и состояние парка цистерн основного подвижного состава для перевозки нефтеналивных грузов за последние годы претерпели значительные изменения.

Активный парк цистерн (за исключением цистерн в нерабочем парке) на сети РЖД по состоянию на конец 2 полугодия 2022 составил 252,6 тыс. ед., что выше показателя декабря 2021 г. на 0,2 % или на 0,6 тыс. ед. (Рис. 3).

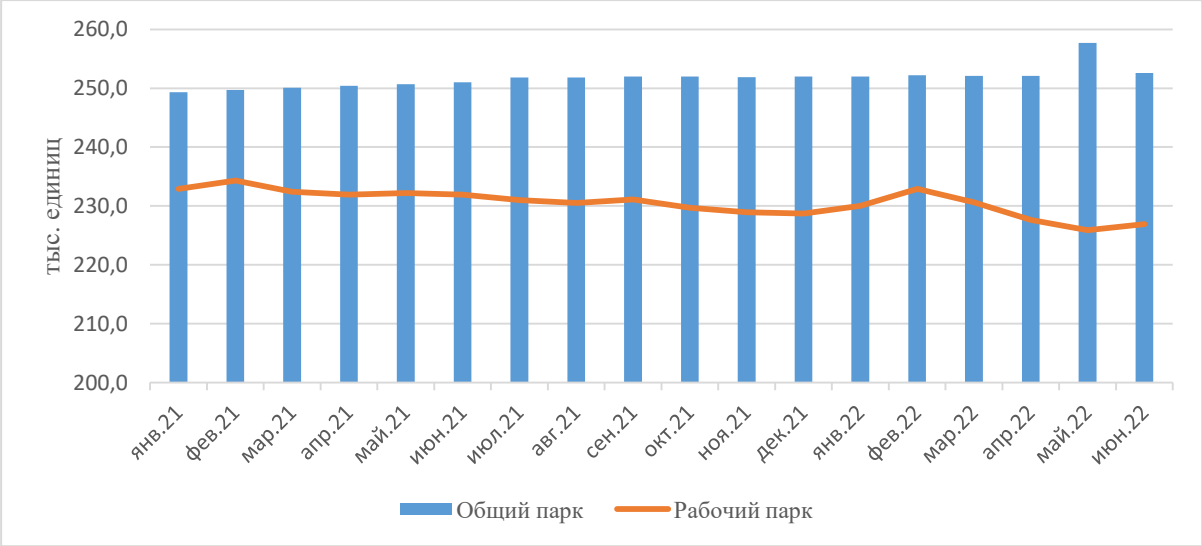


Рис. 3. Динамика общего и рабочего парка цистерн в 2021–2022 гг., тыс. единиц

Источник: расчеты авторов на основе данных [5]

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

При этом, потребности в транспортировке нефти и нефтепродуктов, претерпев существенные структурные изменения в объемах, предъявляемых к перевозке железнодорожным транспортом и направлениях перевозки, выросли. Так, на фоне введения в конце 2022 года странами ЕС эмбарго на российскую нефть, а также установленного на уровне $60 за баррель потолка цен на нее, транспортировка нефти на экспорт трубопроводным и морским транспортом снизился в декабре 2022 года на 11 % относительно прошлого месяца (560 тыс. тонн в сутки). При этом, растет потребность в перевозке нефтепродуктов, что показывает рост загрузки российских НПЗ на 1,5 % или до 794 тыс. тонн в сутки. Сопоставляя объемы нефти и нефтепродуктов, предъявляемых к перевозке железнодорожным транспортом с возможностью железнодорожных операторов, очевиден дефицит вагонов – цистерн [10].

2. Анализ факторов и причинно-следственных связей, влияющих на эффективное использование подвижного состава операторами железнодорожного транспорта.

По данным информационного агентства «INFOLine» к концу 2022 г. задействованный в перевозочном процессе подвижной состав российских собственников (в ноябре) достиг нового исторического максимума в 1,15 млн. единиц, а незадействованный, напротив, находится на минимальных более чем за 3 года уровнях. При этом нарастает дефицит вагонов.

Первым фактором дефицита вагонов является преобладание списания вагонов над их производством. Производство вагонов в большей степени ориентировалось на максимальный с 2014 г. спрос на грузовые вагоны. В 2019 г. было списано 19,8 тыс., а закуплено – 75 тыс. В 2021 г. закупки грузовых вагонов почти достигли уровня 2018 г., а списание выросло до 25,7 тыс. В 2022 г. объемы списания (без учета заблокированных на Украине и национализированных вагонов) превысили 21 тыс. Высокий процент списания грузовых вагонов привел к дефициту подвижного состава на сети РЖД.

Что касается нефтеналивных цистерн, то за период с 2019 по первое полугодие 2022 г. было списано 14,0 тыс. цистерн и закуплено 13,8 тыс. цистерн (Рис. 4). За первое полугодие 2022 г. парк цистерн сократился на 6,91 тыс. единиц [11]. Производство цистерн за последние 8 лет сократилось в 10 раз, с 2000 единиц в 2016 году до 212 цистерн в 2021 году.

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

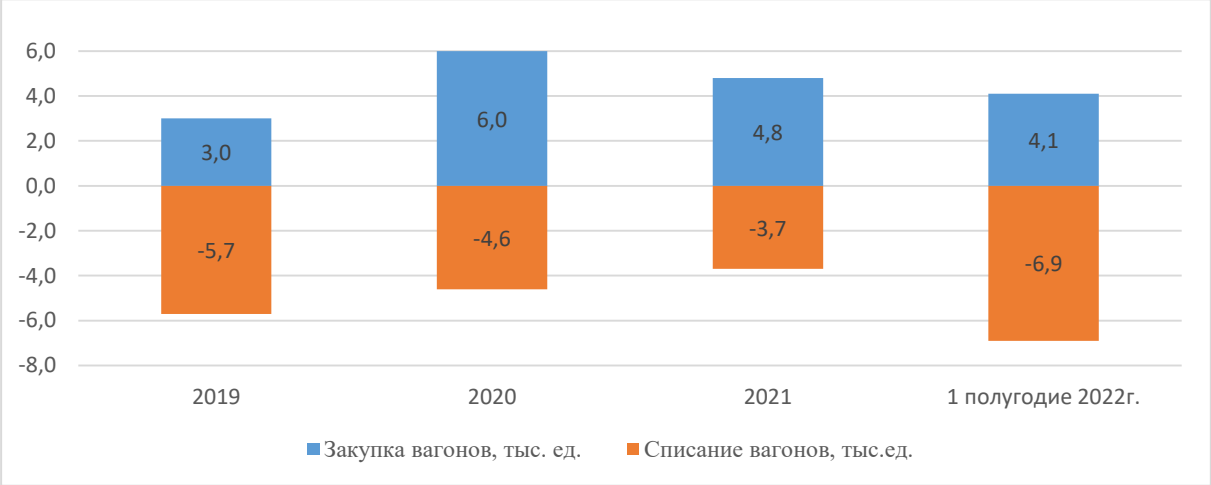


Рис. 4. Изменение структуры парка грузовых вагонов

Источник: расчеты авторов на основе данных [9]

С 2022 года производство всех видов грузовых вагонов стало снижаться по разным причинам [12]. Так, производители инновационных вагонов с повышенной грузоподъемностью со II квартала 2022 г. испытывают проблемы с приобретением кассетных подшипников, производство которых характеризуется высокой консолидацией и по ключевым комплектующим зависит от импорта. После начала специальной операции на Украине компании-производители с иностранным участием, такие как: Amsted Rail, SKF и Timken приняли решение прекратить бизнес в России. В ряде компаний идут процессы реформирования, например, «Тимкен» вышло из совместного предприятия с НПК «ОВК»; ООО «Тимкен ОВК», «Бренко» – из группы «ЕПК-Бренко». ООО «СКФ» переименовано в «Тек-Ком Производство», линейка которого пока полностью не восстановлена. Ряд заводов, в частности, ОВК заказы принимает, но «без выхода на сеть до конца 2022 года». Более того, основные производители уже законтрактованы на этот год и частично на 2024-й. общая недопоставка цистерн серьезно скажется на рынке сырья и его ценах. [13].

Процесс модернизации вагонов потерял смысл после приказа Минтранса России от 25.12.2015 № 382 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации», который ввел запрет на продление сроков службы вагонов 353 моделей, которые эксплуатируются на сети железных дорог. Было разрешено модернизировать только 42 модели вагонов-цистерн [14].

Второй пик списания ожидается в 2024-2026 гг. и составит более 10 тыс. вагонов ежегодно.

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

Вторым фактором дефицита вагонов-цистерн является использование подвижного состава в качестве «склада на колесах». В связи с тем, что нефтеперерабатывающие заводы производят продукцию непрерывно, осуществление остановки выработки продукции невозможно, а нефтехранилища на территории предприятия ограничены, в связи с наложенными санкциями на РФ отгрузка в порты ограничена, в следствии чего заводы вынуждены осуществлять погрузку в железнодорожный подвижной состав и отставлять груженные вагоны в отстой с целью ожидании согласования отправки в порты.

Так, на начало 2022 года среднесуточное количество груженых вагонов-цистерн, брошенных и находящихся в отстое на сети РЖД, достигло 9 тыс. единиц. Данный показатель в 2,4 раза больше, чем годом ранее и за 5 лет (2017–2021 годы) [15].

Операторы подвижного состава сообщают, что проблема носит системный характер, и в последнее время отмечается тенденция к ухудшению ситуации.

Кроме того, чтобы компенсировать застрявший в пути парк, грузоперевозчики вынуждены посылать дополнительные вагоны и нести финансовые потери.

Третьим фактором, который влияет на рост дефицита подвижного состава, является снижение объемов транспортировки нефти трубопроводным транспортом и переход этих объемов на железнодорожный, а также рост потребности в перевозке нефтепродуктов. После введения санкций со стороны ЕС направление отгрузок нефтепродуктов было изменено с портов Северо-Запада на восточный полигон. Несмотря на то, что транспортировка нефтепродуктов трубопроводным транспортом значительно дешевле, чем железнодорожным, ограниченность трубопроводной инфраструктуры заставляет производителей уходить на железнодорожный транспорт. Компания «Транснефть» впервые с 2016 года отгрузила пробную партию нефтепродуктов в направлении порта Козьмино [16]. Данное направление не использовалось после запуска трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан 2», в настоящий момент комплекс загружен на 100 %.

Дальнейшее переключение нефтегрузов на железнодорожный транспорт потенциально влечет дефицит железнодорожных вагон-цистерн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил систематизировать факторы, влияющие на рынок подвижного состава, а именно вагонов-цистерн, по итогу оценки выявлены следующие проблемы:

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

– увеличение объемов перевозки нефти и нефтепродуктов;

– сокращение парка цистерн (пик списания ожидается в 2035 году, когда срок службы одновременно истечет у 23,2 тыс. вагонов);

– запрет продления сроков службы вагонов;

– сокращение производства вагонов цистерн вагоностроительными заводами;

– сокращение видов груза, перевозимых вагон-цистернами;

– использования подвижного состава, как «склад на колесах»;

– для сохранения данного сегмента рынка и укрепления на нем компаний-операторов необходимо обратить внимание на следующие направления:

– развитие производства и эксплуатации инновационных цистерн;

– ускорение оборота подвижного состава на станциях выгрузки путем точечного планирования подвода подвижного состава на выгрузку;

– развитие новых сервисов и оптимизация тарифной политики по перевозке нефтепродуктов, используя инструменты тарифного коридора, что позволит компенсировать уходящие объемы перевозок на трубопроводный транспорт;

– наращивание объема погрузки в танк-контейнерах, что привлечет клиентов среднего и малого бизнеса и увеличит объемы перевозки. Транспортировка с помощью танк-контейнеров позволяет перевозить практически все нефтехимические грузы, гарантируя высокую безопасность перевозки, и дает возможность использования подвижного состава не только как транспортного средства, но и как хранилища для химических грузов. Кроме того, танк-контейнеры незаменимы при мультимодальных перевозках, особенно в труднодоступные районы где отсутствует железнодорожная инфраструктура;

– разработка новых логистических схем поставок нефти по железной дороге и ввод в действие новых нефтеперерабатывающих предприятий.

НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные исследования в отношении оптимизации затрат и повышения эффективности деятельности операторов железнодорожного транспорта в современных условиях связаны с анализом роста затрат на текущее содержание подвижного состава и оценкой влияния снижения уровня цен на основные нефтепродукты на железнодорожные тарифы;

В качестве одного из вариантов решения данных задач предлагается рассмотреть реализацию долгосрочных проектов по производству инновационных вагонов-цистерн с повышенной грузоподъемностью и сроком службы, что позволит в перспективе сократить затраты на текущее

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

содержание подвижного состава и необходимость меньшего количества подвижного состава для сохранения действующих объемов перевозок.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Хусаинов Ф.И., Ожерельева М.В. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2019. – Т. 4(83). – С. 22–27. [Khusainov FI, Ozhereleva MV. Transportation of coal and oil cargoes by rail transport: current state and prospects. *Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics.* 2019;4(83):22-27 (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=39543741 Ссылка активна на: 15.12.2022.
2. Исследование «Рынок грузового железнодорожного транспорта РФ. Тенденции 2020 г. Прогноз до 2023 года». Информационное агентство «INFO Line» [Study “Freight rail transport market of the Russian Federation. Trends 2020. Forecast until 2023”. News agency «INFO Line» [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: http://infoline.spb.ru/
3. Алифирова Е. Россия в 2021 г. увеличила добычу нефти на 2,2 %, газа – на 10 %. Информационный портал Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. [Alifirova E. Russia v 2021 uvelichila dobychu nefti na 2,2 %, gaza – na 10 %. IA portal Neftegaz.RU [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://neftegaz.ru/news/finance/719930-rossiya-v-2021-g-uvelichila-dobychu-nefti-na-2-2-gaza-na-10/?ysclid=l9n0awlc5y735517915
4. Добыча нефти в России за первое полугодие выросла на 3,4 %. Информационное агентство «Интерфакс» [Электронный ресурс]. [Dobycha nefti v Rossii za pervoe polugodie vyrosla na 3,4 %. News agency “Interfax” [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.interfax.ru/business/853277 Ссылка активна на: 15.12.2022.
5. Союз операторов железнодорожного транспорта. [Union of Railway Transport Operators [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: http://railsovet.ru/
6. Тимофеев А.Г., Лебединская О.Г. Модель PMG/ARDL прогнозирования цены на сырую нефть в условиях неопределенности // Транспортное дело России. – 2022. – Т. 2(159). – С. 16–19. [Timofeev AG, Lebedinskaya OG. PMG/ARDL model for crude oil price forecasting under uncertainty. *Transport business in Russia.* 2022;2(159):16-19 (In Russ.)]. doi: 10.52375/20728689_2022_2_16
7. Ефимова О.В., Бабошин Е.Б., Пшукова К.А. Развитие экосистемы безопасности в контексте целей устойчивого развития для устранения потерь транспортной организации // Транспортное дело России. – 2022. – Т. 2(159). – С. 124–126. [Efimova OV, Baboshin EB, Pshukova KA. Development of a safety ecosystem in the context of sustainable development goals to eliminate losses of the transport organization. *Transport business in Russia.* 2022;2(159):124-126 (In Russ.)]. doi: 10.52375/20728689_2022_2_124

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

8. Договор о Евразийском экономическом союзе (Подписан в г. Астане 29.05.2014) (ред. от 24.03.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 03.04.2023). Приложение № 2 к Протоколу о скоординированной (согласованной) транспортной политике. Порядок регулирования доступа к услугам железнодорожного транспорта, включая основы тарифной политики. [Dogovor o Eurasiiskom ekonomicheskom soyuze (Podpisan v Astane 29.05.2014) (rev. of 24.03.2022) (as am. and sup. enter into force 03.04.2023). Prilozhenie N2 k Protokolu o skoordinirivannoi (soglasovannoi) ransportnoi politike. Poryadok regulirovaniya dostupa k uslugam zheleznodorozhnogo transporta, vklyuchaya osnovy tarifnoi poitiki. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.04.2023. Доступно по: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163855/b3e81df236f3bfb1e9e4b346213b7fab0d287b1b/

9. АО «Государственная транспортная лизинговая компания» (ГТЛК) [Электронный ресурс] [AO Gosudarstvennaya transportnaya lizingovaya kompaniya (GTLK). [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://www.gtlk.ru/

10. Шкарупа А.А. Промышленность России: итоги 5 месяцев 2022 года // Техника железных дорог. – 2022. – Т. 3(59). – С. 12–17. [Shkarupa AA. Russian industry. Five month of 2022 results. *Railway Equipment Journal*. 2022;2(58):30-36. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tmmwjg Ссылка активна на: 02.05.2023.

11. Федеральная служба государственной статистики «О промышленном производстве в I полугодии 2022 года». [Rosstat. O promyshlennom proizvodstve v I polugodii 2022 goda. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/123_27-07-2022.html Ссылка активна на: 15.12.2022.

12. Саакян Ю.З. 15 лет развития железнодорожного машиностроения России: итоги и перспективы // Техника железных дорог. – 2023 – Т. 1(61). – С. 10–19. [Saakyan YuZ. 15 years of development of railway engineering in Russia: results and prospects. *Railway Equipment Journal*. 2023;1(61):10-19. (In Russ.)]. Доступно по: https://ipem.ru/content/%D0%A2%D0%96%D0%94/%D0%A2%D0%96%D0%94%20061%20(1)%20%D1%84%D0%B5%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%202023.pdf Ссылка активна на: 02.05.2023.

13. Алешина А. Дефицит цистерн нарастает: производители законтрактовали программу на будущий год. Информационное агентство «РЖД-Партнер.ру». 06.12.2022. [Aleshina A. Deficit cistern narastaet: proizvoditeli zakontraktovali programmu na budushchiy god. IA “RZD-Partner.ru”. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/defitsit-tsistern-narastaet-proizvoditeli-zakontraktovali-programmu-na-budushchiy-god/ Ссылка активна на: 27.12.2022.

14. Приказ Минтранса России от 25.12.2015 № 382 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации, утвержденный приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 года № 286». [Prikaz Mintransa Rossii 25.12.2015 N 382 “O vnesenii izmeneniy v Pravila technicheskoy expluatacii zheleznyh dorog Rossiiskoy Federacii, utverzhdenniy prikazom Ministerstva transporta Rossiiskoy Federacii 21.12.2010 N 286”. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://mintrans.gov.ru/documents/7/4630

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

15. Свинцова Е. 9 тыс. цистерн с нефтепродуктами оказались брошены на сети РЖД. Информационный портал Neftegaz.RU. [Svintsova E. 9000 cistern s nefteproduktami okazalis' brosheny na seti RZD. IA portal Neftegaz.RU. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/719305-9-tys-tsistern-s-nefteproduktami-okazalis-brosheny-na-seti-rzhd/?ysclid=l9n2bsyrck37707167 Ссылка активна на: 15.12.2022.
16. Пробную партию нефти доставили в порт Козьмино по железной дороге. Агентство экономической информации «Прайм». [Probnuyu partiyu nefti dostavili v port Koz'mino po zheleznoy doroge. Business news agency PRIME. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://1prime.ru/oil/20221004/838347919.html Ссылка активна на: 02.05.2023.

Сведения об авторах:
Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Печкуров Вадим Андреевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 2054-3333; ORCID: 0009-0005-2087-210X;
E-mail: vadimpechkurov@mail.ru

Information about the authors:
Natalia A. Zhuravleva, Doctor of Economics, Professor;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Vadim A. Pechkurov, postgraduate student;
eLibrary SPIN: 2054-3333; ORCID: 0009-0005-2087-210X;
E-mail: vadimpechkurov@mail.ru

Цитировать:
Журавлева Н.А., Печкуров В.А. Анализ состояния рынка вагонов-цистерн в России и оптимизация операционных моделей компаний операторов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 97–109. doi: 10.17816/transsyst20239297-109

To cite this article:
Zhuravleva NA, Pechkurov VA. Analysis of the tank car market in Russia and optimization of operating models of operator companies. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;9(2):97-109. doi: 10.17816/transsyst20239297-109

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.025.6
DOI 10.17816/transsyst202392110-120

© С.А. Смирнов, О.Ю. Смирнова
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПЕРСПЕКТИВЫ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА В ЕДИНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА

Обоснование: Изменения в геополитической обстановке, начавшиеся в 2022 году, оказали влияние на транспортную отрасль Российской Федерации и государств-членов Евразийского экономического союза. Возникла необходимость реорганизации производственно-сбытовых цепочек и формирования логистических маршрутов с учетом новых реалий при соблюдении взаимных интересов всех участников транспортных и экономико-географических процессов. Продолжается развитие евразийских транспортных коридоров и реализация инфраструктурных проектов с использованием инновационных подходов.

Цель: рассмотреть перспективы использования магнитолевитационной транспортной технологии на пространстве государств-членов Евразийского экономического союза.

Материалы и методы: методология исследования построена на анализе методов логистики, социально-экономического анализа, а также макроэкономических методов. Информационная база исследования опирается на официальную правовую и методическую информацию органов власти Российской Федерации и Евразийской экономической комиссии.

Результаты: в результате исследования определена ниша магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза, на качественном уровне описаны ожидаемые эффекты от внедрения магнитолевитационного транспорта.

Заключение: исследование подтверждает, что в современных условиях необходимы инновационные логистические решения для развития международных транспортных коридоров. Предложенный нейрологистический подход обосновывает необходимость и эффективность внедрения магнитолевитационного транспорта в единую интегрированную транспортную систему Евразийского экономического союза в качестве ее неотъемлемого элемента.

Ключевые слова: международные транспортные коридоры, единая интегрированная транспортная система, логистика, нейрологистический подход, магнитолевитационный транспорт, Евразийский экономический союз.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S.A. Smirnov, O.Yu. Smirnova
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

PROSPECTS OF MAGLEV TRANSPORT IN THE UNIFIED INTEGRATED TRANSPORT SYSTEM OF THE EURASIAN ECONOMIC UNION

Background: The changes in the geopolitical situation that began in 2022 had an impact on the transport industry of the Russian Federation and the member countries of the Eurasian Economic Union. There was a need to reorganize supply chains and form logistics routes taking into account new realities while respecting the mutual interests of all participants in transport and economic and geographical processes. The development of Eurasian transport corridors and the implementation of infrastructure projects using innovative approaches continues.

Aim: to consider the prospects of using maglev transport technology in the space of the member countries of the Eurasian Economic Union.

Materials and methods: the research methodology is based on the analysis of logistics methods, socio-economic analysis, as well as macroeconomic methods. The information base of the study is based on official legal and methodological information of the authorities of the Russian Federation and the Eurasian Economic Commission.

Results: as a result of the study, the niche of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian Economic Union is determined, the expected effects of the introduction of maglev transport are described at a qualitative level.

Conclusion: the study confirms that innovative logistics solutions are needed in modern conditions for the development of international transport corridors. The proposed neuro-linguistic approach substantiates the necessity and effectiveness of the introduction of maglev transport into a unified integrated transport system of the Eurasian Economic Union as its integral element.

Key words: international transport corridors, unified integrated transport system, logistics, neurological approach, magnetic levitation transport, Eurasian economic union.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные коридоры, проходящие через территорию государств-членов Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС), определены на нормативном уровне.

До недавнего времени развитие наземных транспортных коридоров «Восток–Запад» реализовывалось преимущественно в рамках инициативы Китая «Один пояс – один путь»: требовалось регулярное движение товаров в государства Европейского союза.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Часть грузов переориентировалось с морского маршрута через Суэцкий канал на сушу, но их доля оставалась незначительной в общей структуре перевозок. Однако факторы скорости, ритмичности и стоимости перевозок, эффективности работы с неравномерным грузопотоком позволяли формировать конкурентные преимущества сухопутным маршрутам.

Ввиду изменений на международной арене с февраля 2022 года, во-первых, Россия и Беларусь оказались фактически вычеркнуты из международного транзита на коридоре «Восток–Запад». Одновременно с этим под вопросом оказалась устойчивость морского маршрута через Суэцкий канал. Как показала геополитическая практика, введение рядом стран массовых ограничений возможно в достаточно сжатые сроки и в узком консенсусе. Дальнейшее развитие устойчивых сухопутных коридоров по территориям стабильных во внешнеполитическом отношении стран получило особую важность (Рис. 1) [1].

Во-вторых, интенсифицировались экспортно-импортные перевозки в Россию. Произошла переориентация грузопотоков на восток, что вызвало рост нагрузки на транспортные сети на этом направлении. Соответственно, образовался дефицит провозных способностей.

И в-третьих, наметилась тенденция укрепления направления «Север – Юг», способствующая изменению грузопотоков [2, 3].

Таким образом, транспортно-логистическая система государств-членов ЕАЭС и соседних стран, не входящих в состав ЕАЭС, претерпела значительные изменения. Новые конфигурации выразились не только в смене вектора грузопотоков, но и в появлении принципиально новых для транспортных систем государств-членов ЕАЭС условий [4].

ВЫЗОВЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЕАЭС

Современная ситуация, которая характеризируется высокой турбулентностью и неопределенностью, как в отношении цепочек поставок, так и в отношении объемов поставок и условий работы, требует высочайшей гибкости в организации логистики. Устойчивость транспортных коридоров становится одной из наиболее важных характеристик. При этом транспортный коридор приобретает очертания своеобразной нейросети, способной создавать вариативность маршрутов и обеспечивать оперативное замещение слабых или перегруженных участков.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

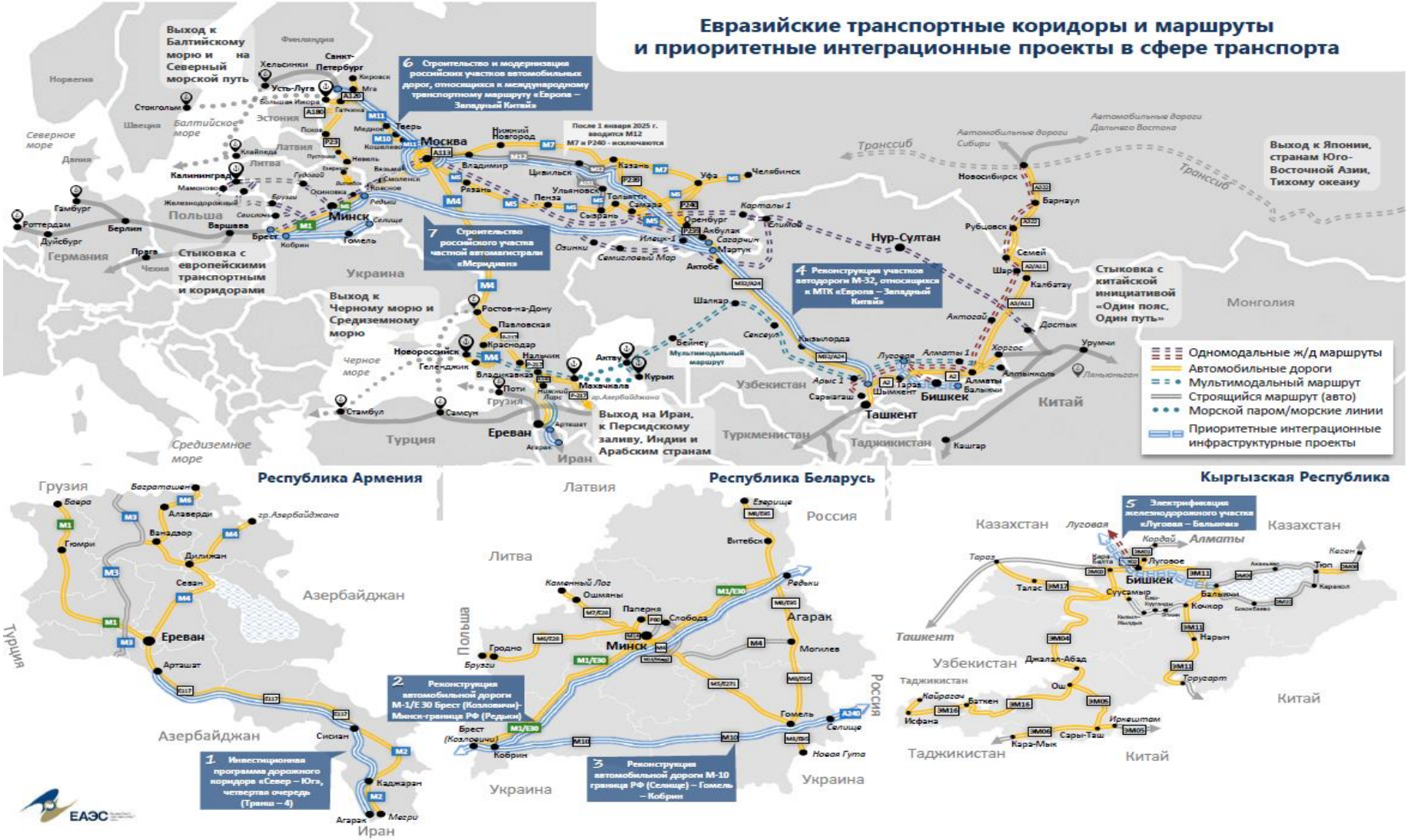


Рис. 1. Транспортные коридоры Евразийского экономического союза

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Следует констатировать, что уровень текущего развития транспортной инфраструктуры государств-членов ЕАЭС, а также Китая не соответствует необходимому. Ограниченность вариантов маршрутов поставок и емкости отдельных маршрутов, наличие инфраструктурных барьеров сдерживает исполнение реальных объемов потребностей в перевозках. Это, в свою очередь, сдерживает экономическое развитие стран, на территории которых расположена актуальная и перспективная транспортная инфраструктура. Вместе с этим нельзя не отметить, что в текущих условиях реализация инфраструктурных проектов не должна осуществляться в течение десятилетий. Скорость реализации такой нейрологистики напрямую будет влиять на экономическое благополучие государств-членов ЕАЭС и определять его на годы вперед.

Создание эффективной нейрологистической сети возможно только на основе единой интегрированной транспортной системы:

– все виды транспорта обладают определенной степенью взаимозаменяемости и взаимно дополняют друг друга в единой транспортной системе;

– потенциал грузооборота и пассажирооборота на пространстве ЕАЭС существенно превышает наличные возможности транспортной инфраструктуры;

– достигается оперативная гибкость в логистике.

При этом номенклатура видов транспорта должна быть дополнена магнитолевитационным – транспортом, позволяющим достичь необходимого уровня инновационности транспортной системы по перевозочным характеристикам (Рис. 2).

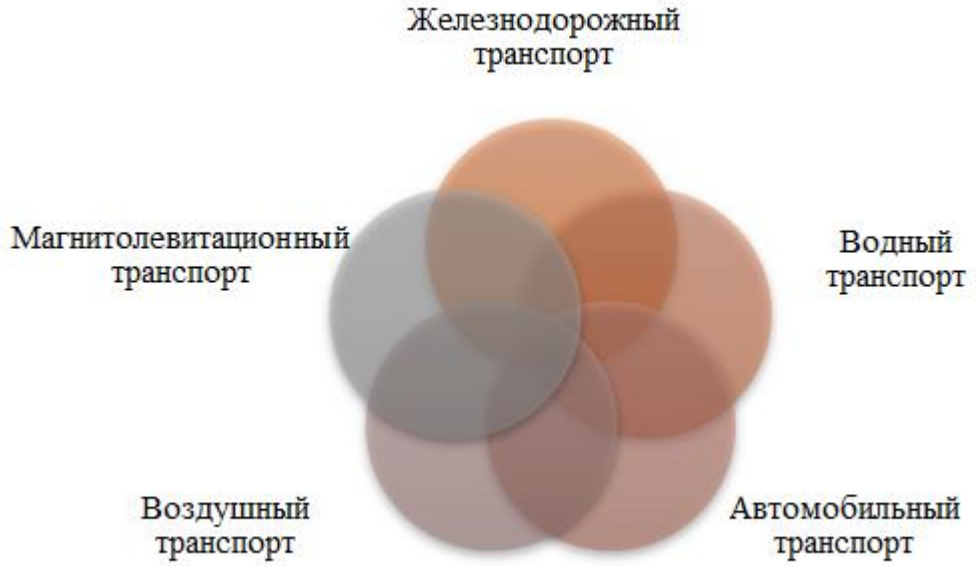


Рис. 2. Модель единой интегрированной транспортной системы

Received: 10.05.2023 Revised: 27.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 Одобрена: 27.06.2023 Принята: 30.06.2023

МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫЙ ТРАНСПОРТ: ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В транспортной сфере физическое явление магнитной левитации используется в целях исключения физического взаимодействия пути и подвижного состава, в результате чего решаются различные фундаментальные проблемы – от сил сопротивления движению до износа элементов транспортной системы.

Технология магнитной левитации не нова и ведет отсчет с 1911 г. Серьезные исследования и работы проводились в мире по официальным данным с 1960-х гг. К XXI веку уровень развития технологии позволил достичь экономической целесообразности ее внедрения. С тех пор технология дешевеет [5, 6].

В настоящее время в трех странах мира – в Китае, России и Японии – магнитолевитационная транспортная технология отражена в основополагающих документах стратегического транспортного планирования [7–9]. Магнитолевитационная транспортная технология развивается на всех континентах, количество перспективных проектов увеличивается (Табл. 1) [10].

Таблица 1. Перспективные магнитолевитационные транспортные проекты мира

Страны / Континенты	Магнитолевитационные транспортные проекты
Китай	• Национальный транспортный план на 2021-2035 гг.: строительство 6 600 км новых высокоскоростных линий; • Постепенный перевод ВСМ на магнитную левитацию; • Развитие маглев-систем для мегаполисов
Япония и Южная Корея	• Высокоскоростная линия Токио–Нагоя–Осака (438 км, Япония); • Переориентация внутренних перевозок с авиатранспорта на маглев (Япония); • Строительство высокоскоростной линии Сеул–Бусан (Южная Корея)
Америка	• Проект строительства линии Балтимор–Вашингтон (США) в стадии общественных слушаний; • Проект внутригородской линии в Рио-де-Жанейро (Бразилия)
Европа	• Разработан ряд проектов в Германии, Швеции, между Германией и соседними странами, Россией; • Пройдена тестовая эксплуатация грузовой линии в порту Гамбург; • Разрабатывается проект городской линии в г. Мюнхен (Германия)

Отечественные разработки в области магнитолевитационного транспорта находились на высоком уровне до 1990-х гг. Однако по объективным причинам к 2010-м гг. Россия в данной сфере оказалась в роли догоняющей [11].

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

К настоящему моменту разработки современных российских инженеров и ученых проявились в создании технологии «Российский Маглев» (далее – «РосМаглев»), которая кратно превзошла зарубежные аналоги по эффективности и может обеспечивать массовые перевозки грузов. Технология позволяет осуществлять транспортировку на высоких скоростях, проявляет гибкость в отношении массогабаритных характеристик перевозимых грузов, обеспечивает перевозки малых партий грузов за счет самостоятельного движения отдельных транспортных единиц, и, что важно в текущих экономических условиях, имеет быстро возводимую инфраструктуру.

Наиболее значимыми особенностями магнитолевитационного транспорта являются:

– гибкое приспособление инфраструктуры к ландшафту;
– возможность строительства практически в любых условиях;
– быстрое возведение инфраструктуры при ее низкой стоимости;
– малые объемы обслуживания инфраструктуры при высокой пропускной способности;
– высокая коммерческая скорость и приспосабливаемость под определенные нужды;
– низкие расходы на эксплуатацию подвижного состава;
– низкая стоимость жизненного цикла;
– отсутствие износа от физического контакта;
– высокие экологические характеристики (Табл. 2).

Технический облик транспортной системы на базе технологии «РосМаглев» представлен на Рис. 3.

Таблица 2. Особенности технологии «РосМаглев»

Параметр	Характеристика параметра
Особенности строительства	• Не требует использования тяжелой техники для строительства (масса 1 м пути до 7,5 т, против 22-29 т ж.д. пути, нагрузка 1 кг/см^2 против 5 000-10 000 кг/см^2 для ж.д.); • Установка модульных конструкций; • Землеотвод 7,2 м (для ж.д. 20 м)
Сроки и стоимость строительства	• Срок строительства 100 км пути 6-9 мес. (для ж.д. 39 мес.); • Стоимость 1 км пути составляет около 50% от стоимости строительства ж.д.
Эксплуатация инфраструктуры	• Малообслуживаемая, низкий объем ремонтов; • Пропускная способность до 30 раз выше, чем на ж.д
Эксплуатация подвижного состава	• Коммерческая скорость до 250 км/ч (на ж.д. транспорте – до 40 км/ч); • Срок жизненного цикла 50-100 лет; • Отсутствие жестких ограничений по габаритам и грузоподъемности

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Параметр	Характеристика параметра
Расходы	• Малый объем обслуживания подвижного состава; • Потребность в подвижном составе в 4-8 раз ниже ж.д., нет потребности в локомотивах; • Эксплуатационные расходы на 30-50 % ниже ж.д.
Эффективность и экологичность	• Стоимость 1 года жизненного цикла в 2,5 раза ниже, чем на ж.д.; • Отсутствие износа от трения и ударных нагрузок; • Отсутствие выбросов пыли, ГСМ, тяжёлых металлов

Источник: составлено авторами

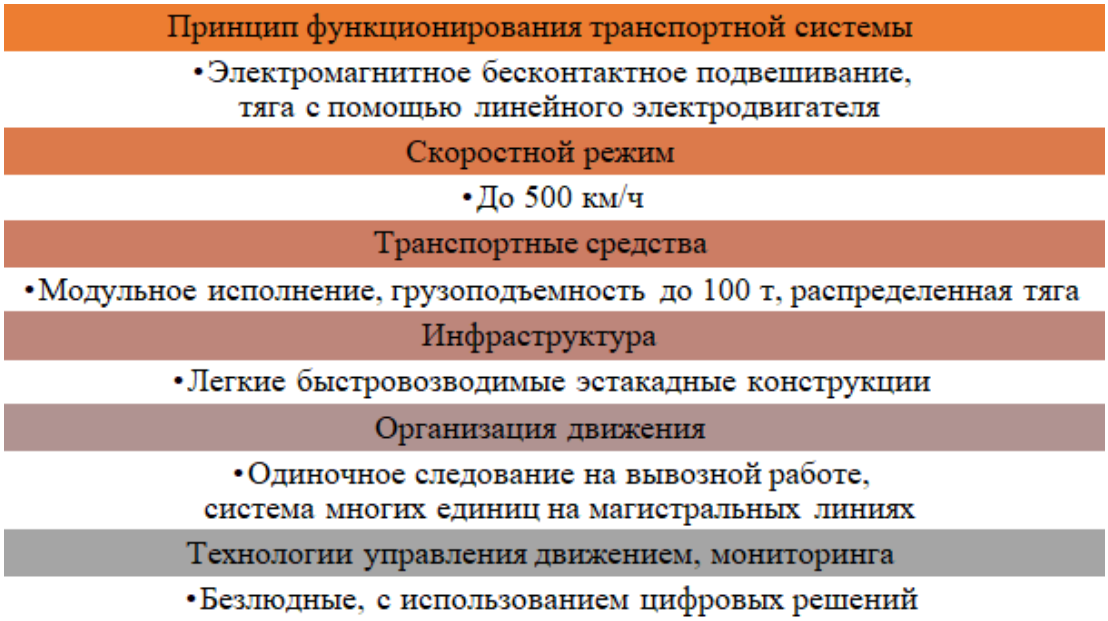


Рис. 3. Технический облик транспортной системы на базе технологии «РосМаглев»

Магнитолевитационный транспорт в единой интегрированной транспортной системе может использоваться в следующих направлениях:

- вывозные линии в портовой логистике – транспортировка грузов между причалом и складом временного хранения, «сухим портом»;
- сбор партий грузов с предприятий и складов на крупные терминалы – сборка малых партий грузов одиночно следующими левитационными вагонами на станции формирования железнодорожных составов;
- межтерминальная безостановочная транспортировка грузов – перевозка грузов без перегрузок, ландшафтных барьеров, таможенных барьеров, минуя сложности с преодолением территорий других стран по выделенной эстакаде;
- перевозка груженых автомобилей в режиме контрейлера – погрузка автомобилей (в том числе, груженых) для преодоления естественных и искусственных преград, спрямления маршрута.

Received: 10.05.2023 Revised: 27.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 Одобрена: 27.06.2023 Принята: 30.06.2023

В результате внедрения технологии «РосМаглев» в единую интегрированную транспортную систему государств-членов ЕАЭС ожидается ряд положительных изменений, вызванных улучшением транспортно-логистической сети (Рис. 4).

Рис. 4. Влияние технологии «РосМаглев» на транспорт ЕАЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Единая интегрированная транспортная система Евразийского экономического союза находится в стадии становления. В изменившихся условиях повысились требования к ее гибкости и эффективности. Магнитолевитационный транспорт на основе технологии «Российский Маглев» на пространстве государств-членов Евразийского экономического союза предлагает существенную технологическую и экономическую полезность. Ключевым фактором, обеспечивающим ее, является возможность быстрой прокладки магистралей в любых природных условиях. Интеграция магнитолевитационного транспорта в единую транспортную систему государств – членов ЕАЭС позволяет кардинально повысить технологическую и экономическую эффективность их транспортных систем, в том числе сглаживая проблемы недостаточной провозной способности отдельных участков транспортной сети и объектов терминально-логистического хозяйства.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Минобрнауки России (Постановление Правительства РФ от 13.05.2021 № 729).

Received: 10.05.2023 **Revised:** 27.06.2023 **Accepted:** 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена:** 27.06.2023 **Принята:** 30.06.2023

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Официальный портал Евразийского экономического союза. [Oficial'nyj portal Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.06.2023. Доступно по: http://www.eaeunion.org
2. Аналитический доклад «О макроэкономической ситуации в государствах-членах Евразийского экономического союза и предложениях по обеспечению устойчивого экономического развития». [Analiticheskij doklad «O makroekonomicheskoj situacii v gosudarstvah-chlenah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza i predlozheniyah po obespecheniyu ustojchivogo ekonomicheskogo razvitiya». (In Russ.)]. Доступно по: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/b59/Analytical_report_2022.pdf Ссылка активна на: 15.06.2023.
3. Под председательством Алексея Оверчука состоялось заседание Совета Евразийской экономической комиссии. [Pod predsedatel'stvom Alekseya Overchuka sostoyalos' zasedanie Soveta Evrazijskoj ekonomicheskoj komissii. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://government.ru/news/48311/
4. Логинов В. Встречи и предложения: зачем главы правительств ЕАЭС и СНГ собрались в Сочи [Loginov V. Vstrechi i predlozheniya: zachem glavy pravitel'stv EAES i SNG sobralis' v Sochi. (InRuss.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: https://iz.ru/1524991/valentin-loginov/vstrechi-i-predlozheniia-zachem-glavy-pravitelstv-eaes-i-sng-sobralis-v-sochi
5. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 204–220. [Smirnov SA, Smirnova OY. Evaluation of effectiveness of different transport modes for regular mass freight transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):204-220. (Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734204-220
6. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Особенности оценки социально-экономических эффектов, возникающих в результате строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 142–156. [Smirnov SA, Smirnova OY. Features of the assessment of socio-economic effects arising from the construction of lines of freight maglev transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):142-156. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst202283142-156
7. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf
8. Устойчивое развитие транспорта в Китае. Информационное бюро Государственного совета Китайской Народной Республики. [Ustojchivoe razvitie transporta v Kitae. Informacionnoe byuro Gosudarstvennogo soveta Kitajskoj Narodnoj Respubliki.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

(In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695320/1695320.htm

9. Shibayama T. Japan's transport planning at national level, natural disasters, and their interp lays. *European Transport Research Review*. 2017;9(3). doi: 10.1007/s12544-017-0255-7
10. Официальный портал Международного совета по магнитной левитации. [Oficial'nyj portal Mezhdunarodnogo soveta po magnitnoj levitacii. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.06.2023. Доступно по: https://www.maglevboard.net/
11. Ульянов Н. Магнит тянет в полет. [Ul'yanov N. *Magnit tyanet v polet*. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: https://expert.ru/expert/2021/18/magnit-tyanet-v-polet/

Сведения об авторах:
Смирнов Сергей Александрович, ведущий научный сотрудник, руководитель НОЦ ПП имени А.А. Зайцева;
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Смирнова Ольга Юрьевна, старший научный сотрудник, заместитель руководителя НОЦ ПП имени А.А. Зайцева;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Information about the authors:
Sergei A. Smirnov, Leading Researcher, Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development;
eLibrary 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Olga Yu. Smirnova, Senior Researcher, Deputy Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Цитировать:
Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Перспективы магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 110–120. doi: 10.17816/transsyst2023922110-120

To cite this article:
Smirnov SA, Smirnova OYu. Prospects of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian economic union. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2023;9(2):110-120. doi: 10.17816/transsyst202392110-120

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2023;9(2)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

30.06.2023

120 страницы Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2782-3733 (Online)

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

Электронный рецензируемый научный журнал
Выходит ежеквартально – 4 раза в год
Основан в 2013 году

ИНДЕКСАЦИЯ

РИНЦ (Российский индекс научного цитирования)
ВАК (Высшая аттестационная комиссия)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А.Ю. Гнатенко
Редактор сайта М.Д. Боярский
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова
Верстка Т.С. Антонова

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-81789 от 31.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

Сетевой электронный журнал "Транспортные системы и технологии" публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

Журнал отбирает материал для публикации из числа присланных для рассмотрения рукописей. В ходе отбора проводится независимое двойное слепое рецензирование членами редакционной коллегии и внешними экспертами.
Для публикации рукопись, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: http://trassyst.ru/
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 9, № 2 **2023**

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Панычев Александр Юрьевич
к.э.н., доцент, ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Титова Тамила Семёновна
д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Первый проректор – Проректор по науке ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР
Никитин Виктор Валерьевич
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Богданов Александр Владимирович, д.физ.-мат.н., профессор СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;
Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор Заведующий кафедрой «Экономика транспорта», Директор Института прикладной экономики и бухгалтерского учета железнодорожного транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Клюшпис Йоханнес, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;
Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д.т.н., профессор, президент РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Кручинина Ирина Юрьевна, д.т.н., директор ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия;
Ли Вэйли, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;
Линь Гобинь, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Ледяев Александр Петрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены», ведущий научный сотрудник Научно-аналитической группы по развитию городского транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Ма Чжисюнь, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Мулюков Радик Рафикович, член-кор. РАН, д.физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;
Ни Фэй, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР;
Никитенко Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Подсорин Виктор Александрович, д.э.н., профессор РУТ (МИИТ), Москва, Россия ;
Повадол Сирирангси, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паняпиватского института управления, Паккред, Таиланд;
Смирнов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Мосты» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Смирнов Сергей Александрович, Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок имени А.А. Зайцева ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Соломин Владимир Александрович, д.т.н., профессор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Стэфан Ричард, д.т.н., полный профессор Факультета электротехники, заведующий Лабораторией электрических машин Федерального университета Рио-де-Жанейро, Рио-де-Жанейро, Бразилия;
Талантова Клара Васильевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Терешина Наталья Петровна, д.э.н., профессор, Заведующая кафедрой «Экономика и управление на транспорте» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Хан Хьёнг-Сук, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL ISSN 2782-3733 (Online)

FOUNDER AND PUBLISHER
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
St. Petersburg, Russia

"MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"
Electronic peer-reviewed research journal
Issued 4 times a year (quarterly)
Established in 2013

INDEXING
eLibrary (Russian Science Citation Index)
Higher Attestation Commission of Russia's Ministry of Education and Science (VAK)
Google Scholar
WorldCat
Crossref
CyberLeninka

CONTACTS
Address: 190031, St. Petersburg, 115 Moskovskiy Ave., room 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
Website: www.transsyst.ru
Phone: +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
Translation into English A.Yu. Gnatenko
WEB- Editor M.D. Boyarsky
The Executive Editor O.Yu. Smirnova
Layout Editor T.S. Antonova

AIMS & SCOPE
Network electronic journal "Modern Transportation Systems and Technologies" publishes articles of a fundamental nature and application areas, as well as review articles pertaining to all types of transport technology

JOURNAL CONTENT SELECTION
The journal selects material based on the double-blind peer-review conducted by members of the editorial board and external experts.
To be published, the manuscript and all accompanying files should be sent to the editorial team through a personal account on the journal's website at: http://trassyst.ru/
The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2023

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 9, Issue 2 **2023**

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF
Aleksandr Y. Panychev
PhD, Associate professor, rector PGUPS, St. Petersburg, Russia

Deputy EDITOR-IN-CHIEF
Tamila S. Titova
Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Scientific Work PGUPS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

THE SCIENTIFIC EDITOR
Viktor V. Nikitin
Dr.Sc., Professor, Professor Departments Electric Power Traction and Theoretical Bases of Electrical Engineering PGUPS, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD
Aleksandr V. Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;
Vladimir D. Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Natal'ya A. Zhuravleva, Dr. Economics, Professor Head of the Department of Economics of Transport, Director of the Institute of Applied Economics and Accounting of Railway Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Johannes O. Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology, Munich, Germany;
Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc.., Professor, the President Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Irina Kruchinina, Dr.Sc., Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;
Weili Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;
Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director, Professor, Tongji University, Shanghai, China ;
Aleksandr P. Ledyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Tunnels and Subways", Leading Research Fellow Scientific and Analytical Group for the Development of Urban Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;
Radik R. Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS, Ufa, Russia;
Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center, Tongji University, Shanghai, China;
Vladimir A. Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Viktor A. Podsorin, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;
Sirirangsi Poovadol, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;
Vladimir N. Smirnov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Bridges" PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Sergey A. Smirnov, Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Vladimir A. Solomin, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Richard Magdalena Stephan, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;
Klara V. Talantova, Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures
Natalya Tereshina, Dr. Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;
Han Hyung-Suk, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

СОДЕРЖАНИЕ		TABLE OF CONTENTS
ОБЗОРЫ		**REVIEWS**
Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Техносферная безопасность транспортных систем Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Пути совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта	5	Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Technosphere safety of transport systems Titova T.S., Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		**ORIGINAL STUDIES**
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей	19	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Vataev A.S., Dedova O.A., Nikitin V.V. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Кузнецов А.А., Изварин М.Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов	33	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Kuznetsov A.A., Izvarin M.Yu. Use of regenerative braking energy in the passenger coaches heating system
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнические комплексы и системы Лисов А.А., Возмилов А.Г., Кулева Н.Ю., Согрин А.И., Закиров Р.А.,Илимбетов Р.Ю. Выбор тягового электродвигателя для Арктического электротранспорта	44	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnical complexes and systems Lisov A.A., Vozmilov A.G., Kuleva N.Yu., Sogrin A.I., Zakirov R.A., Ilimbetov R.Yu. Selection of a traction electric motor for Arctic electric transport
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций	57	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Ground transport and logistics facilities and complexes Sugorovsky A.V., Sugorovsky A.V. A typical simulation passenger module for a comprehensive study of railway directions, junctions and stations

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования	66	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Fedoseev N.A., Svalbova V.A., Alekseev S.V. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram
Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге	83	Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels Makhonko A.A., Malkov A.V., Belyi A.A., Antonyuk A.A. Experience in operating the monitoring system for a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Журавлева Н.А., Печкуров В.А. Анализ состояния рынка вагонов-цистерн в России и оптимизация операционных моделей компаний операторов	97	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Zhuravleva N.A., Pechkurov V.A. Analysis of the tank car market in Russia and optimization of operating models of operator companies
Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Перспективы магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза	110	Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Smirnov S.A., Smirnova O.Yu. Prospects of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian economic union

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Техносферная безопасность транспортных систем

УДК [UDC] 551.583.2
DOI 10.17816/transsyst2023925-18

© Т.С. Титова, Р.Г. Ахтямов, Н.А. Мещерякова
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЛАНА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

Цель: Разработка комплекса рекомендаций по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта.

Методы: Методом исследования являлся анализ факторов климатического риска, и их динамика, а также особенности возникновения отказов на устройствах связи и автоматики в условиях меняющегося климата.

Результаты: Предлагаемые направления совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта заключаются в учете априорной вероятности при оценке климатических рисков для объектов транспорта, а также рассмотрении влияния экзогенных геологических процессов на транспортные объекты. Показано, что объектами транспортной инфраструктуры, испытывающими существенное влияние со стороны меняющих факторов климатического риска, являются системы связи и автоматики. Инклюзивность при разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта может достигаться, в том числе форсированной подготовкой кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта и рассмотрение технологий поглощения парниковых газов как мер по адаптации к изменениям климата в области транспорта.

Заключение: Учет предложений по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта позволит акцентировать внимание на уязвимых к изменениям климата системам, обеспечить необходимый уровень профессиональной подготовки кадров для реализации плана адаптации, включить технологии поглощения парниковых газов в деятельность отрасли и обеспечить участие в разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта всех заинтересованных сторон.

Ключевые слова: адаптация к изменению климата; природные стихийные явления; план адаптации; климатические риски; технологии поглощения выбросов; устойчивость; управление рисками; изменение климата.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS
Field – Technosphere safety of transport systems

© T.S. Titova, R.G. Akhtyamov, N.A. Mescheriakova
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

WAYS TO IMPROVE CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLAN OF THE TRANSPORT

Aim: Development of recommendations for improving the climate change adaptation plan in the field of transport.

Methods: The research method was the analysis of climate risk factors and their dynamics, as well as the features of failures in communication and automation devices in a changing climate.

Results: The proposed directions for improving the climate change adaptation plan in the field of transport are to take into account a priori probability when assessing climate risks for transport facilities, as well as considering the impact of exogenous geological processes on transport facilities. It is shown that the transport infrastructure that are significantly affected by the changing factors of climate risk are communication and automation systems. Inclusiveness in the development of climate change adaptation activities in the field of transport can be achieved, including accelerated training of personnel for the implementation of the climate change adaptation plan in the field of transport and the consideration of greenhouse gas absorption technologies as climate change adaptation measures.

Conclusion: Taking into account proposals for improving the climate change adaptation plan in the field of transport will focus on climate-vulnerable systems, provide the necessary level of professional training for the implementation of the adaptation plan, include greenhouse gas absorption technologies in the industry and ensure participation in the development of measures to adaptation to climate change of all stakeholders.

Key words: adaptation to climate change; natural disasters; adaptation plan; climate risks; negative emissions technologies; stability; management of risks; climatic change.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время динамика климатических изменений наблюдается по всему миру, при этом особенностью данного процесса является то, что оно фиксируется как на общемировом, так и на локальном уровне. Драйвером ускорения глобального изменения климата является использование ископаемого топлива в качестве энергоресурса. Это приводит к антропогенно обусловленному росту содержания парниковых газов в атмосфере. Реализации концепции устойчивого развития с поэтапным сокращением выбросов парниковых газов основывается, как на принятии дифференцированного подхода к использованию энергоресурсов, так и на внесении корректив в деятельность различных отраслей, в том числе транспортной.

Во исполнение Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года [1] Министерство транспорта утвердило План адаптации к изменениям климата в области транспорта [2] с предоставлением ежегодных отчетов о ходе выполнения мероприятий плана. Субъектами адаптации, относящимися к железнодорожной отрасли, определены строительство автомобильных и

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

железных дорог, междугородные и международные пассажирские перевозки, грузовые перевозки.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ ПО АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

В качестве климатических рисков для транспортной отрасли отмечается, что изменение климата и его последствия могут негативно сказаться как на строительстве, так и на эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. В частности, таяние многолетней мерзлоты создает риск полной или частичной утраты функциональности объектов транспортной инфраструктуры в связи с тем, что около 70 % инфраструктуры в зоне Арктики расположены в районах таяния многолетнемерзлых грунтов. Сезонное оттаивание или пучение грунта, а также термокарстовые просадки приводят к повреждению линейных сооружений инфраструктуры. При снижении количества морского льда вдоль побережья повышается вероятность волнового воздействия, в том числе на прилегающие к береговой зоне железные дороги. Отмечается рост среднемесячных и максимальных месячных температур за период 2010–2021 гг. (около 5 ^{o}C), что повышает вероятность природных пожаров и увеличение частоты волн жары сопровождающихся экстремально высокими температурами в течение нескольких дней подряд, что приводит к деформации рельсов и последующее уменьшение скорости поездов (а также повышение вероятности схода составов с рельс), и повышает вероятность отказа оборудования сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

В качестве пороговых значений для деятельности и показателей уязвимости выделено то, что при температурах ниже минус 25 ^{o}C происходит деформация металлических конструкций, укорачивание рельсов, замораживание пассажирских вагонов. Температура выше 25 ^{o}C также вызывает деформации металлических конструкций и изгиб рельсовых путей.

Отмечено, что за последние годы в 70 субъектах федерации зафиксировано 1556 случаев полной либо частичной утраты функциональности объектов транспортной инфраструктуры, в том числе железнодорожной: Дальневосточный округ – 41 случай; Сибирский округ – 14 случаев; Северо-Западный округ – 5 случаев.

В качестве новых возможностей для развития в связи с изменением климата отмечается, что сокращение периода отрицательных температур воздуха повышает благоприятность условий работы транспорта и создает предпосылки для увеличения срока эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

К приоритетным адаптационным мероприятиям отнесено:

– внесение изменений в акты Правительства, федеральных органов исполнительной власти, нормативно-методические документы направленных на учет меняющегося климата при проектировании, строительстве, эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры;

– создание системы мониторинга инженерно-геокриологических условий для наблюдения за состоянием линейных объектов инфраструктуры и разработка отраслевой методики расчета климатических рисков и оценки последствий изменения климата;

– оценка климатических рисков, обследование, адаптация и приведение в нормативное состояние искусственных сооружений на полигоне Крымской железной дороги и Восточном полигоне железных дорог;

– создание системы мониторинга изменения климата и чрезвычайных ситуаций природного характера на автомобильных дорогах, а также разработка цифровой платформы с интерактивной картой автомобильных дорог с прогнозными рисками воздействия меняющегося климата;

– проведение исследований по тематике влияния климатических рисков на оказание услуг по страхованию транспортным компаниям;

– формирование перечня объектов транспортной инфраструктуры федерального значения уязвимых к последствиям климатических изменений;

– создание испытательного полигона по апробации новых вяжущих материалов для строительства и обслуживания автомобильных дорог, в том числе разработка регламентов их применения;

– повышение пропускной способности внутренних водных путей, устранение негативного влияния изменения климата и обеспечение глубин, необходимых для судоходства.

В результате оценки климатических рисков для транспортного комплекса РФ выделены следующие климатические факторы и уровни риска:

– таяние многолетнемерзлых грунтов: весьма опасный уровень (70 % объектов транспортной инфраструктуры Арктической зоны);

– повышение средних температур, периоды аномальной жары/засухи: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры);

– изменение среднего уровня моря, усиление разрушительной силы штормов: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры расположенных в прибрежных районах);

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

– изменение интенсивности и частоты экстремальных осадков (наводнения и засухи): весьма опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры);

– природные пожары: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры на территории регионов с высоким риском возникновения природных пожаров);

– сильный ветер/грозы: опасный уровень (100 % объектов транспортной инфраструктуры).

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЛАНА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

Изменение климата повышает вероятность опасных природных процессов, которые могут инициировать чрезвычайные ситуации на транспорте, сопровождающиеся ущербом жизни и здоровью людей, нанесением вреда окружающей среде, сбоями в транспортной работе и значительным материальным ущербом.

1. Финансирование мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Реализация проанализированного комплекса мер по адаптации не требует дополнительного финансирования из федерального бюджета, в соответствии с [2]. Однако защита транспортной инфраструктуры от климатических рисков может потребовать значительных первоначальных инвестиций, но в долгосрочной перспективе позволит предотвратить рост затрат или дорогостоящее переоснащение. При этом следует соотносить стоимость каждого дополнительного мероприятия по адаптации с ожидаемой величиной полученных выгод. Решения, принятые в рамках финансовой оценки могут пересматриваться и обновляться по мере изменения прогнозируемой вероятности или масштаба опасности, уязвимости инфраструктуры или социально-экономических последствий.

Необходима оценка вариантов, как для ближайшего будущего, так и для долгосрочной перспективы, в противном случае ранние действия могут поставить под угрозу будущие мероприятия, например вследствие сокращения финансирования или невозможности реализации будущих мероприятий на существующих или создаваемых объектах. Например, замена оборудования, вышедшего из строя из-за природных стихийных явлений аналогичным, приведет к быстрому восстановлению функционирования, но может вытеснить экономически эффективное оборудование в долгосрочной перспективе, если вероятность подобных опасных природных явлений возрастет.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Оценка климатических рисков для объектов транспорта

При оценке уровня риска климатических факторов целесообразно оценивать не только процент объектов транспортной инфраструктуры подверженных воздействию, но и ущерб объекту транспортной инфраструктуры, а также вероятность проявления данного климатического риска. Для оценки вероятности возможно использование критериев, приведенных в оценочном докладе МГЭИК: практически определенная вероятность 99–100 %, весьма вероятная 90–100 %, вероятная 66–100 %, скорее всего 33–66 %, маловероятно 0–33 %, очень маловероятно 0–10 %, исключительно маловероятно 0–1 % [3].

Кроме того, климатические изменения, наряду с повышением вероятности природных стихийных явлений, могут сопровождаться опасными природными процессами не характерными для данной территории. Это обуславливает низкую или отсутствующую готовность к реагированию на данное экстремальное явление на данной территории. В этой связи, при оценке вероятности целесообразно пользоваться байесовский метод, учитывающий априорную вероятность при определении апостериорной вероятности реализации климатического риска. Данный подход позволит учесть региональную специфику при выявлении частоты неблагоприятных событий, которая используется при оценке климатических рисков для каждого конкретного объекта транспортной инфраструктуры с учетом сценарной структуры изменения климата.

3. Учет влияния экзогенных геологических процессов на транспортные объекты

В качестве факторов климатических рисков не выделены гравитационные экзогенные геологические процессы, такие как оползни, обвалы, осыпи. При этом увеличение количества и интенсивности осадков в теплое время года приводит к существенному росту вероятности возникновения неблагоприятных последствий, которые связаны с потерей устойчивости склонов. Такие риски значительно возрастают при чередовании засушливых периодов с периодами интенсивных ливневых осадков. На Рис. приведено изменение количества оползней в мире с 1900 года по 2019 год по материалам статистических данных размещенных в базе данных EM-DAT [4].

Как видно из Рис., рост количества оползней в мире с 1900 года по 2019 год описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,96. При этом с 2020 года по 2022 год произошло 48 оползней, что составляет 26 % от количества оползней, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

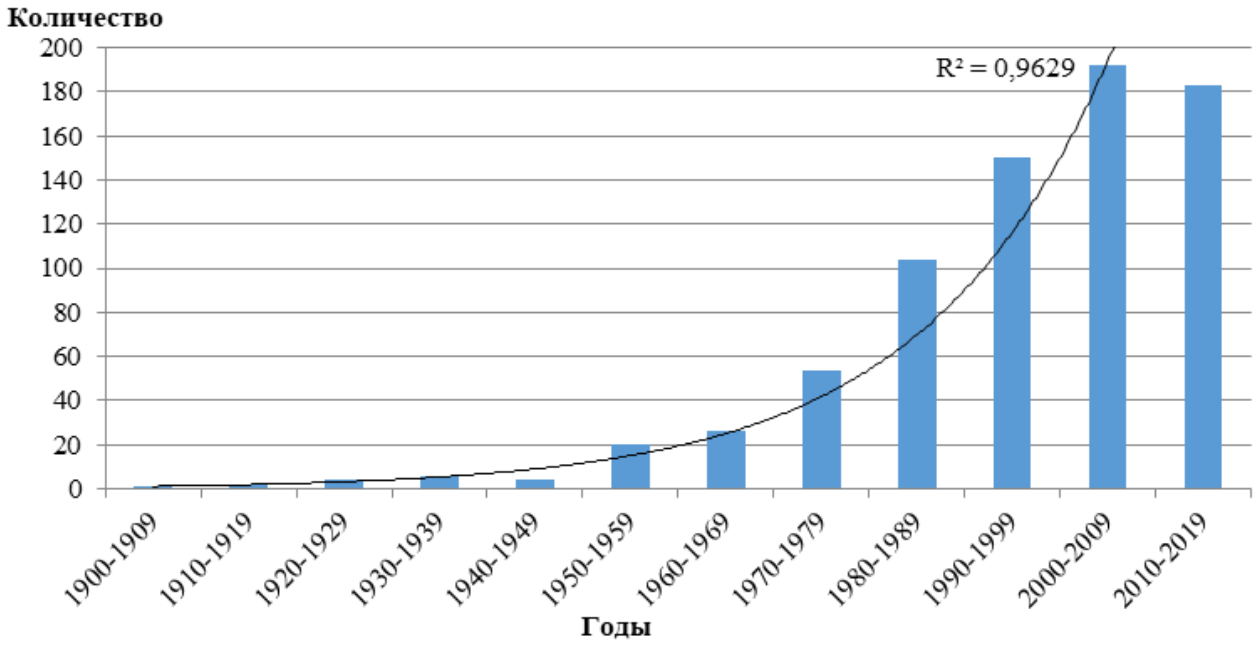


Рис. Изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 год

4. Адаптация к изменениям климата систем связи и автоматики

В перечне приоритетных адаптационных мероприятий не отмечена адаптация систем связи и автоматики, в том числе электронного оборудования, которое испытывает значительные перегрузки при работе в условиях повышенной температуры (например, города усиливают вызванное деятельностью человека потепление на местном уровне). Однако изменение климата повышает вероятность опасных природных процессов, которые могут инициировать техногенные чрезвычайные ситуации.

Большинство железнодорожных объектов показывают повышенную частоту отказов даже при умеренно низких температурах, таких как 20 °C, при этом частота аварий значительно возрастает при превышении температуры 26 °C [5–9]. Эти температуры находятся в пределах климатологических норм температуры, а также в пределах требуемых эксплуатационных характеристик железнодорожной инфраструктуры.

Тепловое расширение также может повлиять на воздушные линии электропередач. При расширении воздушных линий их натяжение уменьшается, что может привести к чрезмерному провисанию. Частота провисания воздушных линий также выше в городских районах из-за эффекта городского острова тепла, который может привести к тому, что городские районы на несколько градусов теплее, чем их окрестности, а дальнейшая урбанизация вместе с более частыми экстремально жаркими периодами увеличат силу волн жары. Города часто являются важными транспортными узлами, и отказ здесь может быть очень проблематичным,

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

быстро распространяясь на остальную часть сети, вызывая значительные задержки в перевозке пассажиров и грузов. Следовательно, понимание природы связанных с жарой происшествий на таких критических участках имеет существенное значение.

Гораздо менее изучено влияние тепла на оборудование СЦБ. В отличие от воздушных линий именно современные виды оборудования СЦБ имеют тенденцию быть более восприимчивыми к сбоям, связанным с нагревом, из-за их повышенной зависимости от электрических и электронных компонентов. Оборудование, находящееся под прямыми солнечными лучами, наиболее уязвимо к перегреву, и, в частности, оборудование внутри контейнеров может испытывать более быстрые изменения температуры и более высокие экстремальные температуры, чем то, которое находится снаружи.

Существуют следующие причины отказов связанных с последствиями климатических изменений для объектов транспортной инфраструктуры.

– большинство происшествий, связанных с жарой, происходит в период с начала до середины лета, а затем снижается, несмотря на то, что температура остается высокой. Это связано с исправлением всех полученных отказов оборудования в наиболее жаркий период и предполагает, что система транспортной инфраструктуры становится все более устойчивой в течение лета, поскольку неисправное оборудование ремонтируется или заменяется. Затенение от искусственных сооружений или деревьев, степень которого может меняться в зависимости от времени суток и времени года, является основной причиной пространственных колебаний отказов вследствие перегрева.

– существует значительная уязвимость оборудования СЦБ к теплу. Кроме того повышается вероятность коробления пути, затрат на ликвидацию аварии связанных с жарой и увеличения числа и продолжительности задержек при перевозке пассажиров и грузов.

– широкий спектр оборудования выходит из строя вследствие нагрева, при температурах окружающей среды, находящихся в пределах рабочего диапазона, а также в пределах климатические нормы данного региона. Причинами отказов может быть использование устаревшего оборудования, процедуры технического обслуживания не всегда могут выполняться при значительных величинах температуры окружающего воздуха.

Существующий подход к обеспечению отказоустойчивости оборудования требует пересмотра в средне и долгосрочной перспективе. Так как без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата случаи отказов оборудования и коробления пути увеличатся в будущем более теплом климате.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Управление тепловыми рисками в критических узлах является обязательным, особенно в городских районах, где эффект острова тепла может привести к значительно более высоким температурам, чем в окружающей местности.

Прогнозируется, что в будущем железнодорожная сеть столкнется с беспрецедентными проблемами из-за более частых высоких температур, и без целенаправленной адаптации или смягчения последствий изменения климата затраты и задержки, связанные с тепловыми рисками, будут увеличиваться. Таким образом, повышение климатической устойчивости транспортной сети в настоящее время имеет существенное значение.

5. Подготовка кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта

Однако климатический кризис формирует перед обществом вызовы, ответ на которые требует комплексного подхода, и включает не только организационные и технические задачи, но и изменение в образовательных подходах.

В п. 16 Национального плана первого этапа адаптации к изменению климата [1] отмечена необходимость включения знаний об изменении климата и адаптации человека и экономики в федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) общего и среднего профессионального образования для просвещения детей и молодежи по вопросам адаптации к изменениям климата.

В настоящее время «применение географических знаний для самостоятельного оценивания уровня безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий: оценивать уровень безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий, в том числе на территории России; оценивать влияние последствий изменений в окружающей среде на различные сферы человеческой деятельности на региональном уровне; сопоставлять, оценивать и аргументировать различные точки зрения по актуальным экологическим и социально-экономическим проблемам мира и России» приведено только во ФГОС среднего общего образования (10–11 класс) [10]. При этом вопросы профессионального обучения, разработки инженерных решений и научное обоснование подходов к адаптации не фигурируют в ФГОС среднего профессионального образования; высшего образования по направлениям подготовки бакалавриата, специалитета, магистров; высшего образования по направлениям подготовки кадров высшей квалификации.

К образованию в области изменения климата следует подходить на институциональном уровне, то есть коллективному переключению внимания на текущую и прогнозируемую климатическую обстановку, с принятием коллективных действий [11].

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

В том числе необходимо принять меры, необходимые для подготовки выпускников высшего образования по профессиям, актуализированным в соответствии с условиями изменяющегося климата (например, образовательные программы: 08.03.01 Строительство; 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника; 20.03.01 Техносферная безопасность; 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 08.05.01 Строительство уникальных зданий сооружений; 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства; 23.05.03 Подвижной состав железных дорог; 23.05.04 Эксплуатация железных дорог; 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов; 23.05.06 Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей). Высшее образование является первой ступенью в профессиональном развитии инженера, однако инженерное образование формирует профессиональные навыки, которые продолжат развиваться на протяжении всей профессиональной деятельности, отвечая на вызовы современного мира.

6. Рассмотрение технологий поглощения парниковых газов как мер по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Наличие связи между программами адаптации и мерами сокращения выбросов парниковых газов позволит расширить возможности реагирования на изменения прогнозов представленных в сценарной структуре [3], а также позволяет управлять факторами климатического риска. В качестве одного из путей адаптации или смягчения последствий изменения климата в плане адаптации в области транспорта может быть рассмотрена разработка и внедрение технологий поглощения выбросов парниковых газов [12–15]. Виды технологий поглощения парниковых газов, которые могут быть внедрены в транспортную отрасль, могут быть отнесены к общим категориям следующим образом:

1. ***Лесоразведение и лесовосстановление*** поглощает углекислый газ в процессе роста лесов. Преимуществом данной технологии является то, что это известная технология, и она может быть реализована с низкими затратами. Однако необходимо учитывать, что для поглощения значительного количества углекислого газа требуются большие площади лесов. При этом существует угроза высвобождения запасенного в древесине углерода при нарушении технологий посадки. Возможны выбросы закиси азота при внесении удобрений для стимулирования роста лесов. Также необходима защита лесов от природных пожаров. В засушливых районах потребность в воде также может быть значимым лимитирующим фактором.

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

2. ***Производство биоэнергии с улавливанием и хранением углерода (BECCS).*** Данная технология заключается в том, что биомасса накапливающая углерод во время роста хранит его в виде органического материала. Данная биомасса может сжигаться на электростанциях (или преобразовываться в другие виды энергии), производя электричество. При этом, углекислый газ образующийся при сжигании улавливается и захоранивается. Биомасса может использоваться для производства водорода, биотоплива или биогаза. Данная технология реализована на демонстрационных моделях, но ее эффективность должна оцениваться в каждом конкретном случае.

3. ***Прямое улавливание CO_2 из окружающего воздуха и хранение (DACCS).*** Значительная часть антропогенных выбросов парниковых газов происходит из распределенных источников. Зачастую улавливание данных выбросов в источнике е является эффективным и нецелесообразным. Для удаления данных выбросов можно производить улавливание углекислого газа непосредственно из окружающего воздуха. Реализация технологии прямого улавливания из атмосферы требует источник энергии и/или тепла с минимальным углеродным следом, что накладывает ограничение на выбор подходящего места расположения территориями, где есть доступ к такому источнику. При прямом улавливании используется сорбент для поглощения углекислого газа в твердой или жидкой фазе. После поглощения углекислого газа, сорбент регенерируется с выделением высококонцентрированного углекислого газа с его дальнейшей транспортировкой и захоронением. Например, в подземных пустотах, из которых идет добыча углеводородов, с последующим закачиванием в горные породы.

Так как ***улавливание и хранение углерода (CCS)*** выступает в качестве компонента в категориях 2 и 3, приведенных выше, а также является технологией прямого смягчения воздействия со стороны точечных источников выброса углекислого газа, данная технология может рассматриваться как отдельная технология отрицательных выбросов [12].

7. Инклюзивность при разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта

Цель адаптации к изменению климата состоит в том, чтобы путем расстановки акцентов на конкретных мероприятиях для конкретных объектов транспортной инфраструктуры установить количественные параметры, в том числе временные, в которых они должны быть реализованы, с учетом приоритетных климатических рисков.

Взаимодействие с заинтересованными сторонами (владельцы инфраструктуры, смежные организации, органы исполнительной власти и местного самоуправления) здесь имеет решающее значение, поскольку

Received: 26.04.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 26.04.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

объекты инфраструктуры являются частью взаимозависимой системы, при этом отказ смежной сети инфраструктуры (например, электроснабжения) связанный с погодными условиями может повлиять на транспортную инфраструктуру. Внешние заинтересованные стороны также могут предоставить информацию об уязвимости управляемых ими объектов при реализации климатических рисков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка показала, что в ряде случаев негативным фактором влияния при оценке климатического риска может служить не сам опасный природный процесс, а инициируемое им природное или техногенное явление, которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной объект транспортной инфраструктуры. Анализируя факторы климатического риска, необходимо определить все возможные объекты воздействия риска (объект, находящийся под воздействием опасного явления, неблагоприятных условий погоды, аномальных климатических условий). При этом увеличение ущерба определяется не только факторами климатического риска, но и уязвимостью объектов транспортной инфраструктуры. Уязвимость определяется как значительной степенью износа объектов, так и имеющимися отклонениями от строительных норм и правил. Кроме того уязвимость ярко проявляется у объектов, расположенных на территориях находящихся в зоне повышенного климатического риска.

Учет предложений по совершенствованию плана адаптации к изменениям климата в области транспорта позволит обеспечить необходимое финансирование мероприятий по адаптации, провести оценку климатических рисков для объектов транспорта с учетом априорной вероятности неблагоприятных событий, учесть растущее влияние экзогенных геологических процессов на транспортные объекты, акцентировать внимание на уязвимости к изменениям климата систем связи и автоматики на транспорте, обеспечить необходимый уровень профессиональной подготовки кадров для реализации плана адаптации, включить технологии поглощения парниковых газов в деятельность отрасли и обеспечить участие в разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата в области транспорта всех заинтересованных сторон.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года. [Nacional'nyj plan meropriyatij pervogo etapa adaptacii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf Ссылка активна на 20.03.2023.
2. План адаптации к изменениям климата в области транспорта. [Plan adaptacii k izmeneniyam klimata v oblasti transporta [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: https://mintrans.gov.ru/documents/9/11749?type=
3. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor M, et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press.* 2023;3056 doi:10.1017/9781009325844
4. Emergency Events Database. [Emergency Events Database [Internet]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: http://www.emdat.be
5. Ferranti E, Chapman L, Lowe C, et al. Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather Clim. Soc.* 2016;8:177-191. doi: 10.1175/wcas-d-15-0068.1
6. Ferranti E, Chapman L, Lee S, et al. The hottest July day on the railway network: Insights and thoughts for the future. *Meteorol. Appl.* 2017;25:195-208. doi: 10.1002/met.1681
7. Chapman L, Huan X, Sanderson V, White S. Modelling of rail surface temperatures: A preliminary study. *Theor.Appl.Climatol*. 2008;92:121-131. doi: 10.1007/s00704-007-0313-5
8. Dobney K, Baker C, Quinn A, Chapman L. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. *Meteor. Appl*. 2009;16:245-251. doi: 10.1002/met.114
9. Dobney K, Chapman L, Quinn A. The future cost to the United Kingdom's railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change. *Proc. Inst. Mech. Eng*. 2010;224:25-34. doi: 10.1243/09544097JRRT292
10. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования. [Federal'nyj gosudarstvennyj obrazovatel'nyj standart srednego obshchego obrazovaniya [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.03.2023. Доступно по: https://base.garant.ru/70188902/8ef641d3b80ff01d34be16ce9bafc6e0/
11. Axelithioti P, Fisher RS, Ferranti EJS, et al. What Are We Teaching Engineers about Climate Change? Presenting the MACC Evaluation of Climate Change Education. *Educ. Sci.* 2023;13:153. doi: 10.3390/educsci13020153
12. Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Реализация подходов к сокращению выбросов парниковых газов в железнодорожной отрасли // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 2 (266). – С. 20–25. [Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Implementation of approaches to reduce greenhouse gas emissions in the railway industry. *Life safety*. 2023;2(266):20-25. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 20.03.2023. Доступно по: https://foto.tgpi.ru/lib/2023/podpis/02/bzhd2.pdf
13. Titova T, Akhtyamov R, Nasyrova E, Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;49:473-478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1_49
14. Nasyrova E, Elizaryev A, Aksenov S, et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences.* 2019;110:02045. doi: 10.1051/e3sconf/201911002045

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

15. Ershova S, Orlovskaya T, Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018;463(4):042040. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042040

Сведения об авторах:
Титова Тамила Семеновна, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 1558-5811; ORCID: 0000-0002-9328-0835
E-mail: titova@pgups.ru

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0002-3664-1147;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Мещерякова Наталья Артемовна, магистрант;
eLibrary SPIN: 2501-4268; ORCID: 0000-0001-8732-219X
E-mail: stella_2000@inbox.ru

Information about the authors:
Tamila Titova, Doctor of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 1558-5811; ORCID: 0000-0002-9328-0835
E-mail: titova@pgups.ru

Rasul Akhtyamov, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0002-3664-1147;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Natalia Mescheriakova, Student;
eLibrary SPIN: 2501-4268; ORCID: 0000-0001-8732-219X
E-mail: stella_2000@inbox.ru

Цитировать:
Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Пути совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18

To cite this article:
Titova TS, Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):5-18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18

Received: 26.04.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 26.04.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК 629.046, 629.067
DOI 10.17816/transsyst20239219-32

© А.С. Ватаев[1], О.А. Дедова[2], В.В. Никитин[1]
[1]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)
[2]Рязанский филиал Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
(Рязань, Россия)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ЭКИПАЖЕЙ

Обоснование: Магнитолевитационный транспорт с комбинированными системами тяги, подвеса и направления на основе сверхпроводящих катушек (СПК) позволяет достигать скорости движения до 500-600 км/ч при весьма существенном (до 150–200 мм) воздушном зазоре, что является важным фактором обеспечения безопасности высокоскоростных перевозок. Однако СПК являются источником сильных внешних магнитных полей, которые в условиях ограниченных габаритов экипажа могут оказывать вредное влияние как на пассажиров, так и на бортовое вспомогательное оборудование.

Цель: анализ внешних магнитных полей СПК систем тяги, подвеса и направления магнитолевитационных экипажей и эффективности ферромагнитных экранов как средства обеспечения электромагнитной безопасности пассажиров и электромагнитной совместимости СПК с прочим бортовым оборудованием.

Материалы и методы: для достижения поставленной цели использованы методы аналитического и численного моделирования магнитных полей СПК с применением современных программных пакетов. В качестве прототипа комбинированной магнитной системы тяги, подвеса и направления принята система магнитолевитационного экипажа MLX-L0, проходящего опытно-коммерческую эксплуатацию на полигоне Яманаши (Япония).

Результаты: показано, что величина внешних магнитных полей СПК систем тяги подвеса и направления в пассажирском салоне экипажа-прототипа превышает предельно допустимые уровни, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами, как без экранирования, так и при пассивном экранировании плоскими стальными листами.

Заключение: пассивное экранирование СПК стальными листами, в том числе многослойными, при заданных габаритах экипажа не обеспечивает требуемого снижения уровня внешних магнитных полей.

Ключевые слова: сверхпроводящая катушка, магнитолевитационный транспорт, ферромагнитный экран, электромагнитная совместимость.

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© A.S. Vataev[1], O.A. Dedova[2], V.V. Nikitin[1]
[1]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)
[2]Ryazan Branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(Ryazan, Russia)

EFFICIENCY OF FERROMAGNETIC SHIELDING OF SUPERCONDUCTING COILS OF HIGH-SPEED MAGLEV CREW

Background: Magnetic levitation transport with combined traction, suspension and guidance systems based on superconducting coils (SCC) allows reaching speeds of up to 500–600 km/h with a very significant (up to 150–200 mm) air gap, which is an important factor in ensuring the safety of high-speed transportation. However, SCC are a source of strong external magnetic fields, which, in conditions of limited crew dimensions, can have a harmful effect on both passengers and on-board auxiliary equipment.

Aim: to analyze the external magnetic fields of the SCC systems for traction, suspension and direction of maglev vehicles and the effectiveness of ferromagnetic screens as a means of ensuring the electromagnetic safety of passengers and the electromagnetic compatibility of the SCC with other onboard equipment.

Materials and methods: to achieve this goal, methods of analytical and numerical modeling of the magnetic fields of the SCC using modern software packages were used. As a prototype of the combined magnetic system of traction, suspension and direction, the system of the MLX-L0 maglev vehicle, which is undergoing pilot commercial operation at the Yamanashi test line (Japan), was adopted.

Results: it is shown that the value of the external magnetic fields of the SCC of the traction and guiding systems in the passenger cabin of the prototype crew exceeds the maximum permissible levels established by domestic and foreign regulatory documents, both without shielding and with passive shielding with flat steel sheets.

Conclusion: passive shielding of the SCC with steel sheets, including multilayer ones, does not provide the required reduction in the level of external magnetic fields for a given vehicle dimensions.

Key words: superconducting coil, maglev transport, ferromagnetic shield, electromagnetic compatibility.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные системы с экипажами на электродинамическом подвесе и синхронным тяговым приводом позволяют обеспечивать скорости движения до 500–600 км/ч при зазоре в системе подвеса порядка 150–200 мм. Такое значение зазора с одной стороны является фактором, повышающим устойчивость транспортной системы к неблагоприятным

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

погодным условиям, в частности, снежным заносам, и повышающим безопасность движения, а с другой стороны требует применения на экипаже сверхпроводящих катушек (СПК) с большими намагничивающими силами, способных создавать достаточно сильные магнитные поля, чтобы обеспечивать электромагнитное взаимодействие с путевыми катушками систем тяги и подвеса. Сильные внешние магнитные поля, рассеиваемые бортовыми СПК в окружающем пространстве, определяют важность проблемы их электромагнитной совместимости с прочим бортовым силовым и информационным электрооборудованием и электромагнитной безопасности пассажиров в салоне экипажа.

В настоящее время на полигоне протяженностью 42,8 км в префектуре Яманаши, Япония (*Yamanashi Maglev Test Line*), в опытно-коммерческой эксплуатации находятся высокоскоростные экипажи *L*0 компании *JR-Central*, оборудованные комбинированной системой синхронной тяги, электродинамического подвеса и направления на основе бортовых СПК, разработанной под руководством *Railway Technical Research Institute* (*RTRI*). В марте 2015 года семивагонный состав из экипажей, спроектированных на крейсерскую скорость 550 км/ч, установил рекорд скорости – 603 км/ч [1]. Планируется, что данный опытный участок станет частью высокоскоростной магистрали *Chuo Shinkansen*, которая к 2027 году должна связать города Токио и Нагоя. Существуют проекты магнитолевитационного транспорта, в которых движение экипажа предполагается осуществлять в среде технического вакуума; в таких системах можно достичь скоростей движения до 1000 км/ч [2–5].

При освоении технологии массового производства высокотемпературных сверхпроводников и снижении их рыночной стоимости магнитолевитационные транспортные системы с электродинамическим подвесом и линейным тяговым приводом на основе СПК могут стать конкурентоспособными по сравнению с другими видами транспорта и найти применение для перевозок пассажиров и грузов на расстояния до 500–1000 км [6].

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА И НАПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭКИПАЖЕЙ

В настоящее время в транспортных системах, обеспечивающих перевозки со скоростями до 450-500 км/ч, нашли применение линейные синхронные двигатели (ЛСД) с длинным статором (трехфазной обмоткой, размещаемой на путевом полотне) и коротким индуктором, размещаемом на экипаже. В системе *Transrapid* используются ЛСД с возбуждением от

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

обычных электромагнитов; в системе *MLU-MLX-L*0 – ЛСД с возбуждением от сверхпроводящих магнитов (СПК) [7].

СПК, применяемые в системах тяги, подвеса и направления, обеспечивают сравнительно высокие значения магнитной индукции, что позволяет создавать транспортные системы с относительно большим значением левитационного зазора и отсутствием массивных ферромагнитных элементов. Для упрощения конструкции магнитной системы и криогенного обеспечения признано целесообразным создавать комбинированные системы тяги, подвеса и направления, т.е. одновременно использовать магнитное поле СПК для создания тягового усилия, сил левитации и боковой стабилизации. Из множества возможных вариантов конструктивного исполнения совмещенных систем тяги, подвеса и направления до полномасштабного исполнения и ввода в эксплуатацию доведена система с вертикальным расположением катушек [8–10].

В настоящее время в опытно-коммерческой эксплуатации на полигоне в префектуре Яманаши (Япония) находятся высокоскоростные экипажи серии *L*0 с комбинированной системой синхронной тяги, электродинамического подвеса и направления (Рис. 1). На путевом полотне размещаются трехфазные катушки статора линейного синхронного двигателя, создающие бегущее магнитное поле, а также 8-образные катушки левитации и боковой стабилизации. На экипаже размещаются сверхпроводящие катушки, которые являются источником магнитного поля как для системы тяги, так и для системы подвеса и боковой стабилизации. Кроме этого, на экипаже размещаются катушки линейного генератора, который питает бортовые потребители энергии: систему охлаждения сверхпроводящих магнитов, систему кондиционирования, освещения и т.п.

Таблица 1. Технические данные сверхпроводящей катушки системы тяги, подвеса и направления [8, 9].

Параметр	**Величина**
Полюсное деление, мм	1350
Длина катушки, мм	1070
Высота катушки, мм	500
Намагничивающая сила, кА	700
Поперечное расстояние между катушками, мм	2980

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

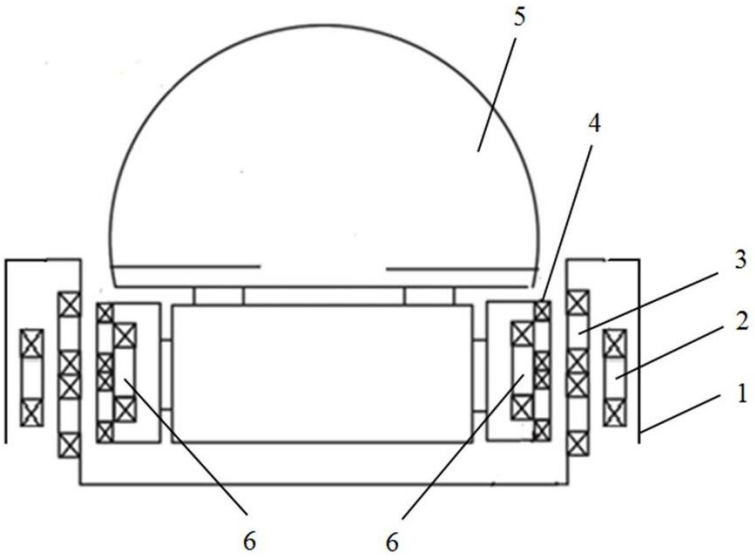


Рис. 1. Схематичный разрез магнитной системы:
1 – путевое полотно;
2 – путевая катушка линейного синхронного двигателя;
3 – путевые катушки системы левитации и боковой стабилизации;
4 – бортовые катушки линейного генератора;
5 – экипаж;
6 – бортовые сверхпроводящие катушки

Основным источником внешних магнитных полей, воздействующих на пассажиров и внутрибортовое оборудование экипажа, являются СПК, намагничивающая сила которых на несколько порядков превышает намагничивающую силу остальных катушек системы. По этой причине на начальном этапе анализа в качестве источника поля будут учитываться только СПК. Магнитная система экипажа, представленная на Рис. 1, принята в качестве прототипа для исследования внешних магнитных полей; на ее основе составлена расчетная схема, приведенная на Рис. 2. СПК имеют трековую форму; в прямоугольной декартовой системе координат (X, Y, Z) рассматривается поперечное сечение катушек вертикальной плоскостью и создаваемое ими плоскопараллельное магнитное поле, позволяющее рассматривать задачу расчета в двухмерной постановке. Направление координатных осей Y, Z показано на рисунке, ось X направлена перпендикулярно плоскости рисунка (вдоль направления движения экипажа).

В расчетной схеме приняты следующие размеры:
$2Z_0 = 2980$ мм;
$2Y_0 = 500$ мм;
$Z_S = 100$ мм;
$Y_S = 100$ мм;
$Y_Q = 600$ мм.
Намагничивающая сила СПК $wI = 700$ кА.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

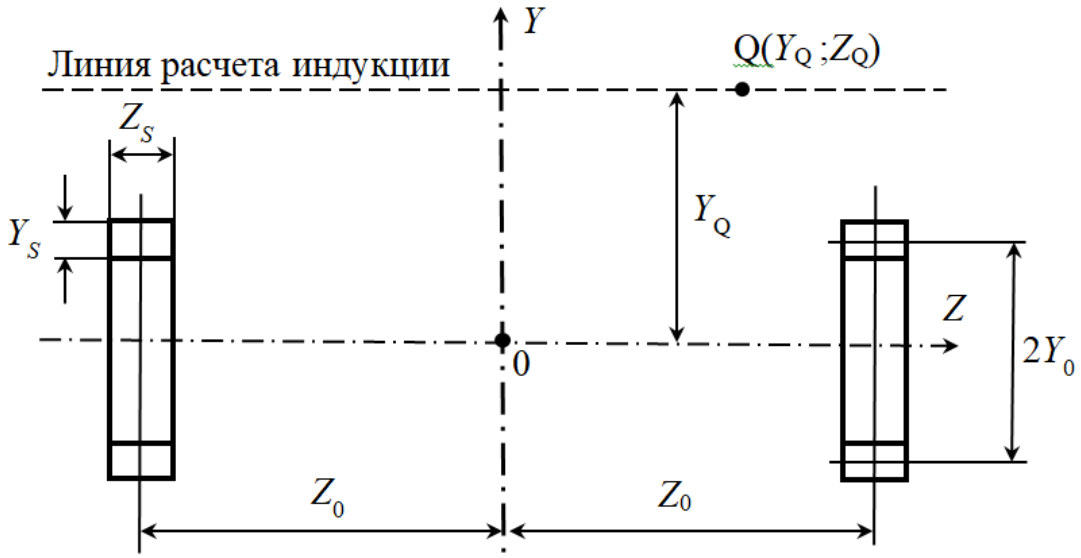


Рис. 2. Расчетная схема магнитной системы СПК

ВНЕШНИЕ ПОЛЯ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК В ОДНОРОДНОЙ НЕМАГНИТНОЙ СРЕДЕ

Внешнее магнитное поле экипажных СПК в немагнитной однородной среде (в отсутствие ферромагнитных экранов) может быть рассчитано на основании принципа суперпозиции как поле совокупности тонких токовых нитей, которыми может быть представлено каждое из поперечных сечений, или как поле совокупности шин прямоугольного сечения [11–13].

Наиболее простые инженерные соотношения получаются при представлении поперечного сечения СПК в виде совокупности тонких токовых нитей. В этом случае компоненты вектора магнитной индукции в расчетной точке Q определяются выражениями:

$$B_Z = \frac{\mu_0}{2\pi}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}(wI)_{ij}\frac{Y_Q - Y_{ij}}{\left(Z_Q - Z_{ij}\right)^2 + \left(Y_Q - Y_{ij}\right)^2};$$

$$B_Y = -\frac{\mu_0}{2\pi}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}(wI)_{ij}\frac{Z_Q - Z_{ij}}{\left(Z_Q - Z_{ij}\right)^2 + \left(Y_Q - Y_{ij}\right)^2},$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

Y_Q, Z_Q – координаты расчетной точки Q;

Y_{ij}, Z_{ij} – координаты эквивалентной токовой нити;

$(wI)_{ij}$ – полный ток эквивалентной нити;

M, N – число эквивалентных токовых нитей по осям Y и Z соответственно.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

При разбиении поперечного сечения СПК на совокупность токовых нитей следует стремиться к тому, чтобы отношение M/N приближалось к отношению соответствующих сторон поперечного сечения катушки. При расчете индукции на существенном удалении от источников поля достаточную точность можно получить уже при величинах MN=1; 2 или 4.

На Рис. 3 представлено распределение модуля индукции магнитного поля вдоль оси Z при различных значениях координат Y_Q расчетных точек.

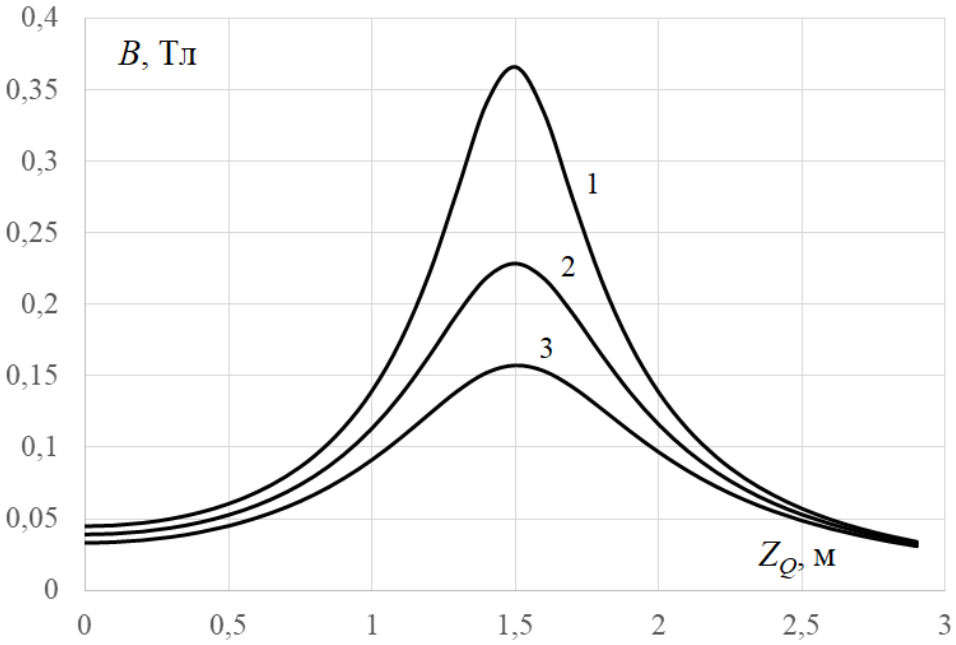


Рис. 3. Распределение модуля магнитной индукции внешнего поля СПК по координате Z_Q при различных значениях Y_Q: 1 – Y_Q=0,5 м; 2 – Y_Q=0,6 м; 3 – Y_Q=0,7 м

Уровню пола пассажирского салона соответствует диапазон значений Y_Q= 0,55…0,6 м; половине ширины пассажирского салона – диапазон значений Z_Q= 0…1,45 м. Расчеты показывают, что на уровне пола пассажирского салона индукция внешнего магнитного поля СПК без учета ферромагнитных экранов составляет B = 30…225 мТл, что существенно превышает предельно допустимый уровень, установленный отечественными и зарубежными нормативными документами. Данное обстоятельство определяет необходимость защиты пассажиров и оборудования от внешних полей СПК.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАТУШЕК С УЧЕТОМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

Защиту внутреннего, весьма ограниченного, пространства экипажа, в котором размещаются пассажиры и оборудование, от внешних магнитных полей СПК системы тяги, подвеса и направления можно осуществлять с

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

помощью пассивных и активных экранов. В первом случае ослабление магнитного поля в экранируемой области достигается за счет физических свойств экранирующей оболочки: высокой магнитной проницаемости стали или диамагнитных свойств сверхпроводникового материала экрана. Принцип активного экранирования основан на создании в заданной области пространства вторичного экранирующего магнитного поля с помощью катушек, обтекаемых током, или постоянных магнитов. При этом вторичное поле направлено встречно полю СПК и частично или полностью его ослабляет [14, 15].

В настоящей статье рассмотрено экранирующее действие пассивных ферромагнитных экранов, как наиболее простого, дешевого и технологичного способа обеспечения защиты пассажиров и оборудования внутри экипажа. Рассматриваются экраны следующих форм: плоский однослойный (в виде стального листа), плоский двухслойный, полуцилиндрический и экран в форме сегмента цилиндра (Рис. 4). Для всех вариантов исполнения толщина ферромагнитного экрана принята 10 мм; расчет магнитного поля ведется в одних и тех же точках экранируемой области пространства на расстоянии Y_Q=600 мм от начала координат (см. Рис. 2).

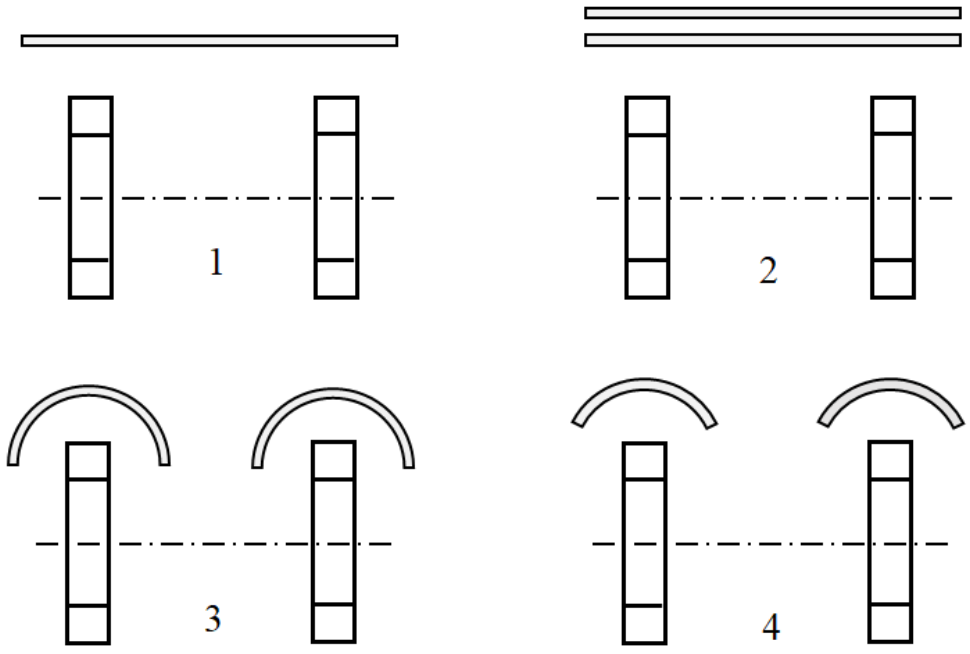


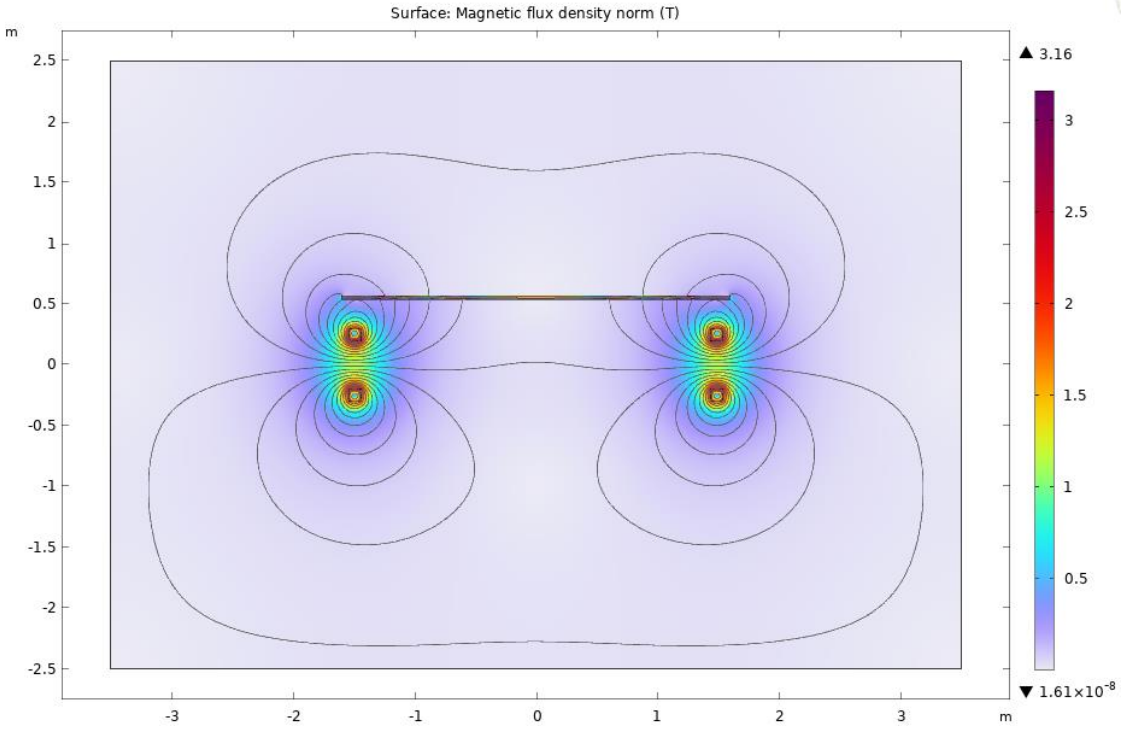
Рис. 4. Формы ферромагнитных экранов:
1 – плоский;
2 – плоский двухслойный;
3 – полуцилиндрический;
4 – сегмент цилиндра

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

Характеристика намагничивания стали представляет собой нелинейную зависимость $B(H)$, поэтому расчет магнитного поля в области за ферромагнитным экраном необходимо вести с использованием программных пакетов расчета магнитных полей в неоднородных средах.

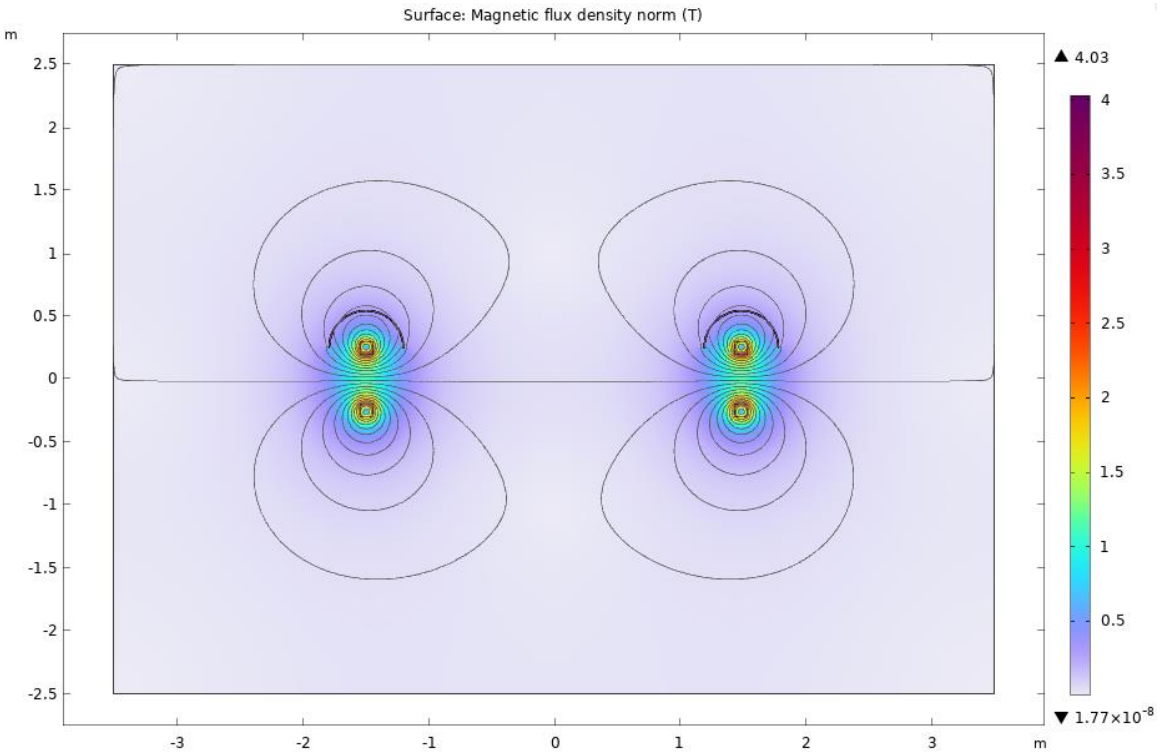
Эффективность экранирования обычно оценивается по величине коэффициента экранирования, который представляет собой отношение магнитной индукции в заданной точке экранируемого пространства без учета магнитного экрана к магнитной индукции в той же точке с учетом защитного действия экрана. Недостатком такого способа является то, что эта оценка – локальная, отнесенная к конкретной точке пространства. Другим способом, который позволяет дать общую оценку свойств экранирующей конструкции во всем заданном объеме, является коэффициент экранирования, определяемый как отношение энергий магнитного поля в объеме без учета экранирующей оболочки и с учетом ее защитного действия [11, 15].

На Рис. 5 представлена пространственная картина распределения магнитного поля для плоского двухслойного, полуцилиндрического экранов и экрана в форме сегмента цилиндра. На Рис. 6 даны кривые распределения модуля магнитной индукции вдоль горизонтальной линии с координатой $Y_Q = 600$ мм, соответствующей уровню пола пассажирского салона.

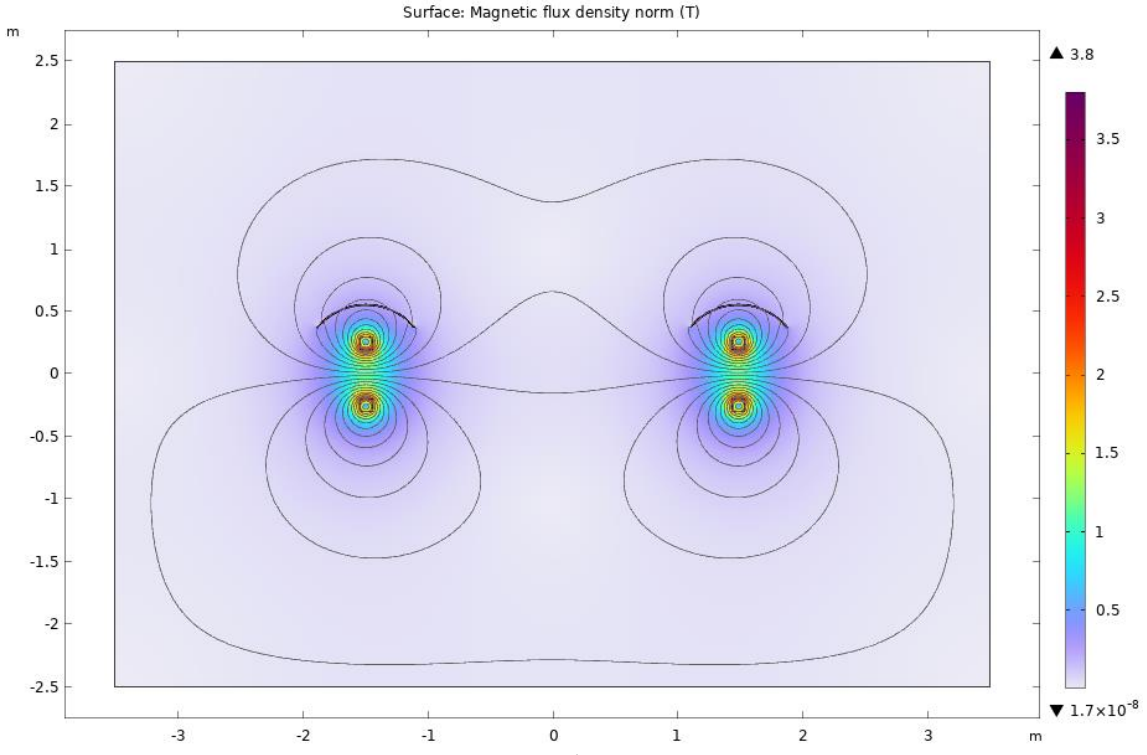


а)

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023



б)



в)

Рис. 5. Картина распределения магнитного поля в пространстве с учетом нелинейных свойств ферромагнитных экранов: плоского двухслойного (а), полуцилиндрического (б) и в форме сегмента цилиндра (в)

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

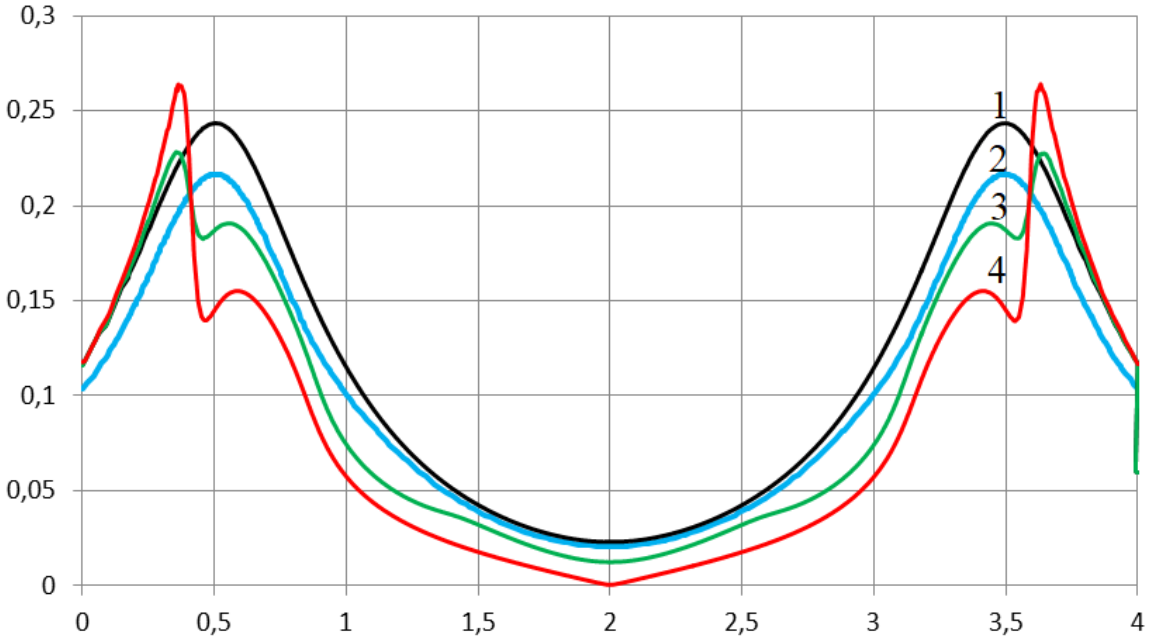


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля по координате Y_Q = 600 мм:
1 – без экранов и с учетом полуцилиндрического экрана;
2 – с экраном в форме сегмента цилиндра;
3 – с плоским однослойным экраном;
4 – с плоским двухслойным экраном

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают, что в отсутствие экранов внешние магнитные поля СПК системы тяги, подвеса и направления в зоне размещения пассажиров и бортового электрооборудования весьма существенны и на уровне пола пассажирского салона вблизи боковой стенки достигают значения 0,245 Тл.

Экранирование внешнего поля СПК с помощью ферромагнитных оболочек в форме полуцилиндра не дает уменьшения индукции в контрольных точках. Наиболее эффективным будет двухслойный ферромагнитный экран, который обеспечит снижение индукции в 1,6…1,7 раза. Однако такой уровень индукции магнитного поля в экранируемой области (до 0,15 Тл) также превышает предельно допустимые уровни, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами. Дальнейшего снижения уровня магнитного поля в заданной области можно добиться применением плоских трехслойных ферромагнитных экранов, однако при этом возрастет масса экипажа и необходимая намагничивающая сила СПК системы тяги и подвеса, а значит и индукция внешнего магнитного поля.

Received: 23.03.2023 Revised: 07.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.03.2023 Одобрена: 07.05.2023 Принята: 30.06.2023

Данное обстоятельство свидетельствует о недостаточной эффективности пассивного ферромагнитного экранирования как средства обеспечения электромагнитной безопасности пассажиров и электромагнитной совместимости СПК и бортового вспомогательного оборудования высокоскоростных экипажей.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Japan's maglev train breaks world speed record with 600 km/h test run. *The Guardian.* United Kingdom: Guardian News and Media Limited. 21 April 2015. Retrieved 21 April 2015. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://www.theguardian.com/world/2015/apr/21/japans-maglev-train-notches-up-new-world-speed-record-in-test-run
2. Hyung WL, Kim KC. Review of Maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics* 2006;42(7):1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
3. Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022, – Т. 8. – № 4 – С. 91–106. [Kim KK, Karpova IM. On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):91-106. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20228491-106
4. Ким К.И., Ким К.К., Вешкин В.В. Магнитное поле и силы в гибридной системе левитации высокоскоростного транспорта // Электричество. – 2021. – № 6. – С. 44–50. [Kim KI, Kim KK, Vechkin VV. Magnetic Field and Forces in a Hybrid Levitation System for a HighSpeed Vehicle. *Jelektrichestvo*. 2021;6:44-50. (In Russ.)]. doi: 10.24160/0013-5380-2021-6-44-50
5. Антонов Ю.Ф., Ли В. Сверхзвуковой наземный транспорт в разреженной среде ограниченного пространства: прорывное или тупиковое направление // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 35–46. [Antonov YF, Li W. Supersonic land transport in the disturbed environment of the limited space: breakthrough or direct direction. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1):35-46. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20173135-46
6. Антонов Ю.Ф. Устройство левитации и боковой стабилизации на базе ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – №4. – С. 115–123. [Antonov YF. Levitation and Lateral Stabilization Device Based on a Second-Generation High-Temperature Superconductor. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):115-123. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201954115-123
7. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. [ZaitsevAA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. 476 p. (In Russ.)]. Доступно по: https://avidreaders.ru/read-book/magnitolevitacionnaya-transportnaya-tehnologiya.html Ссылка активна на: 05.03.2023.

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

8. Boldea I. *Linear Electric Machines, Drives and MAGLEV's Handbook*. CRC Press; 2013. 635 p. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/260711644_Linear_Electric_Machines_Drives_and_MAGLEVs_Handbook_Boldea_I_2013_Book_News
9. Han H-S, Kim DS. *Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications*. Springer; 2016. 246 p. [cited 2023 Jun 9]. Available from: https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-7524-3
10. Kim K.K., Khismatulin M.I., Anisimov G.N. Problem of increasing the efficiency of high-speed transport system with magnetic suspension of vehicle and propulsion linear superconductive synchronous motor // Транспортда ресурс тежамкор технологиялар мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий – техника анжумани илмий: Научные труды республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых, Ташкент, 18–19 декабря 2021 года / Министерство транспорта Республики Узбекистан Ташкентский государственный транспортный университет. – Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2021. – С. 130–135. [Kim KK, Khismatulin MI, Anisimov GN. Problem of Increasing the Efficiency of High-Speed Transport System with Magnetic Suspension of Vehicle and Propulsion Linear Superconductive Synchronous Motor. In: Resursosberegajushhie tehnologii na transporte. Nauchnye trudy respublikanskoj nauchno – tehnicheskoj konferencii s uchastiem zarubezhnyh uchenyh. Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet. Transportda resurs tezhamkor tehnologijalar mavzusidagi horizhij olimlar ishtirokidagi respublika ilmij – tehnika anzhumani ilmij : Nauchnye trudy respublikanskoj nauchno – tehnicheskoj konferencii s uchastiem zarubezhnyh uchenyh, Tashkent, 18–19 dekabrja 2021 goda / Ministerstvo transporta Respubliki Uzbekistan Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet. Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universite; 2021:130-135. (In Russ.)].
11. Аполонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей: монография / под ред. А.Н. Горского. – Москва: Маршрут, 2006. – 986 с. [Apolonskij SM, Gorskij AN. *Raschety jelektromagnitnyh polej*: monograf. Gorskij AN. editor. Moskva: Marshrut; 2006. 986 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01003178933
12. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. – М.: Энергия, 1970. – 376 с. [Binns K, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic field problems*. Moscow: Jenergija; 1970. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://djvu.online/file/UdvfzQUCysVpi
13. Штафль М. Электродинамические задачи в электрических машинах и трансформаторах / Пер. с чеш. В.И. Васина. – М.;Л.: Энергия, 1966. – 200 с. [Shtafl' M. *Jelektrodinamicheskie zadachi v jelektricheskih mashinah i transformatorah*. Per. s chesh. VI. Vasina. Moscow; Leningrad: Jenergija, 1966. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01006495988
14. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 198 с. [Turovskij Ja. *Jelektromagnitnye raschety jelementov jelektricheskih mashin*. Moscow: Jenergoatomizdat; 1986. (In Russ)]. Ссылка активна на: 07.05.2023. Доступно по: http://zodchii.ws/books/info-472.html
15. Аполлонский С.М., Горский А.Н., Никитин В.В. Проблемы электромагнитной без опасности в современных электроэнергетических системах железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 2. – С. 43–47. [Apollonskij SM, Gorskij AN, Nikitin VV. Problems of electromagnetic safety in modern electric power rail system. *Jelektronika i jelektrooborudovanie*

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

transporta. 2017;2:43-47. (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/yktzsx Ссылка активна на: 07.05.2023.

Сведения об авторах:
Ватаев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2832-4481; ORCID: 0000-0002-9285-709X;
E-mail: avataev@yandex.ru

Дедова Ольга Андреевна;
eLibrary SPIN: 9447-2830; ORCID: 0009-0001-7403-8154;
E-mail: dedova@pgups.ru

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;
E-mail: pgups.emks@mail.ru

Information about the authors:
Andrew S. Vataev, Cand. Sci. (Tech.), associate professor;
eLibrary SPIN: 2832-4481; ORCID: 0000-0002-9285-709X;
E-mail: avataev@yandex.ru

Olga A. Dedova;
eLibrary SPIN: 9447-2830; ORCID: 0009-0001-7403-8154;
E-mail: dedova@pgups.ru

Victor V. Nikitin, Dr. Sci. (Tech.), professor;
eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;
E-mail: pgups.emks@mail.ru

Цитировать:
Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 19–32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

To cite this article:
Vataev AS, Dedova OA, Nikitin VV. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):19-32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

Received: 23.03.2023 **Revised: 07.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.03.2023 **Одобрена: 07.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333.41
DOI 10.17816/transsyst20239233-43

© Кузнецов А.А.[1], Изварин М.Ю.[2]
[1]Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Обоснование: Повышение эффективности рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе возможно при создании системы использования энергии рекуперации для отопления вагонов пассажирских поездов.

Цель: создание системы, позволяющей использовать энергию вырабатываемую электровозом постоянного тока при рекуперативном торможении и отсутствии потребителя в тяговой сети с целью отопления пассажирских вагонов.

Материалы и Методы: анализ статистических данных и публикаций по использованию рекуперативного торможения, анализ известных схемотехнических решений в области систем отопления пассажирских вагонов.

Результаты работы: разработаны принципы построения системы, повышающей эффективность рекуперации с преобразованием электрической энергии в тепловую и возможности ее накопления.

Заключение: Создание и внедрение описанной системы позволит повысить эффективность рекуперативного торможения и общую энергоэффективность перевозочного процесса на электрифицированных участках постоянного тока.

Ключевые слова: Электрический подвижной состав, рекуперативное торможение, высоковольтная подвагонная магистраль, комбинированное отопление.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Kuznetsov[1], M.Yu. Izvarin[2]
[1] Omsk State Transport University
(Omsk, Russia)
[2]Emperor Alexander I Petersburg Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

USE OF REGENERATIVE BRAKING ENERGY IN THE PASSENGER COACHES HEATING SYSTEM

Background: Increasing the efficiency of regenerative braking on sections of railways electrified at direct current is possible when creating a system for using recuperation energy for heating passenger coaches.

Aim: development of a system that allows using the regenerative braking energy under conditions absence of a consumer in the traction network for the purpose of heating passenger coaches.

Materials and Methods: analysis of the statistical data and publications on the use of regenerative braking, analysis of known circuit solutions in the area of passenger coaches heating systems.

Results: the principles of constructing a system that increases the efficiency of regenerative braking was developed.

Conclusion: The creation and implementation of the system for the use of regenerative braking energywill improve the efficiency of regenerative braking and the overall energy efficiency of the transportation process in areas electrified with direct current.

Key words: Electric rolling stock, regenerative braking, train high-voltage single-wire DC or AC main line**,** combined heating.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе как в России, так и в мире широко применяется рекуперативное торможение (рекуперация). Рекуперация имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как повышение энергоэффективности перевозок, электрическая и механическая устойчивость, что удобно для поддержания постоянной скорости на спусках, снижение расхода тормозных колодок и износа бандажей электрического подвижного состава (ЭПС). Современный подвижной состав с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) позволяет производить рекуперативное торможение до низких скоростей. Однако применение рекуперации на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе имеет ряд особенностей, связанных с использованием вырабатываемой тяговыми электродвигателями (ТЭД) энергии. Вопросы полезного использования энергии рекуперации рассмотрены в настоящей статье.

1. Возврат энергии при рекуперативном торможении. Чтобы проанализировать количественно возврат энергии в сеть, необходимо иметь статистические данные о возврате электроэнергии в сеть в результате рекуперативного торможения. К сожалению, ОАО «РЖД» не

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

раскрывает подобную статистику, однако среднее значение возврата энергии по отношению к потребленной на тягу, можно рассчитать по данным Федеральной службы государственной статистики «Росстат» и материалам из открытых источников [1, 2] и аналогичных. Год к году возврат энергии от применения рекуперации увеличивается (Рис.1), при этом сама оценка энергоэффективности выполняется как Российскими, так и международными организациями [3].

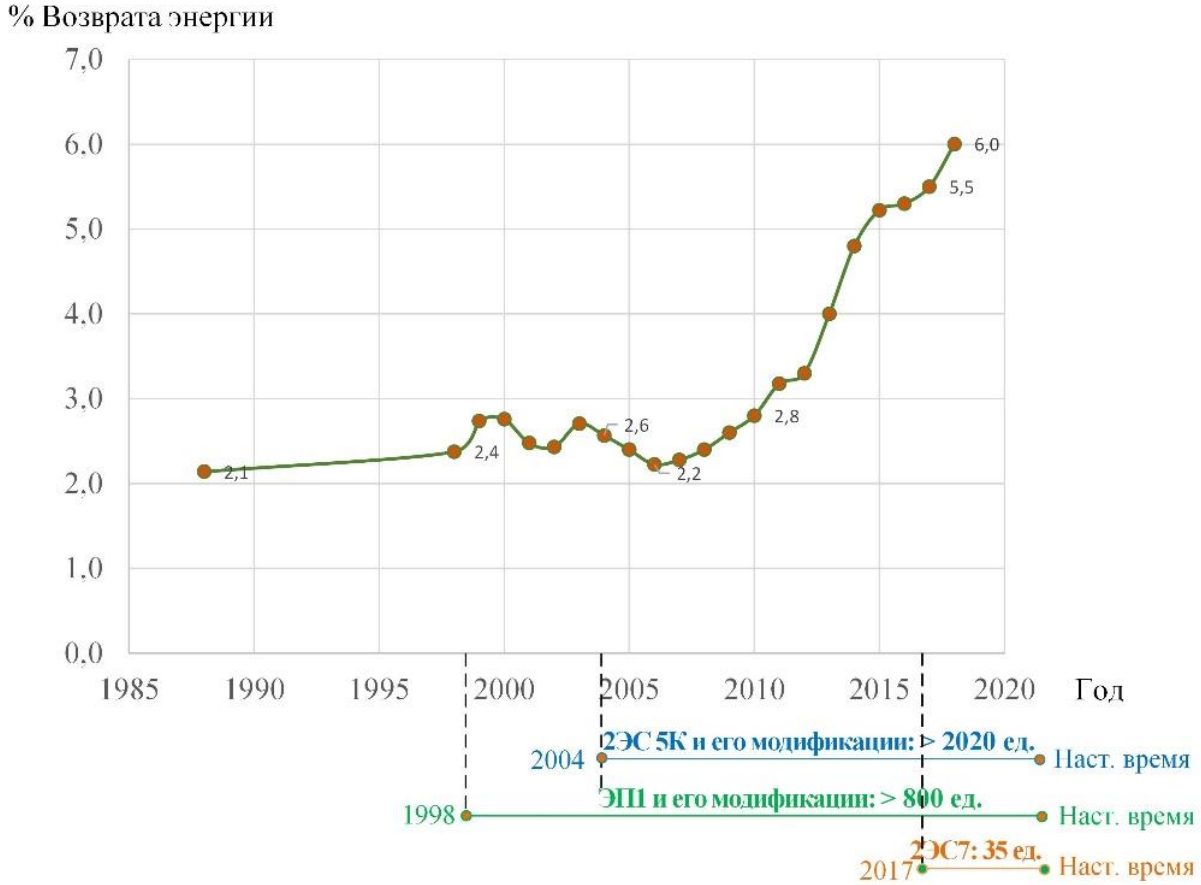


Рис. 1. Возврат энергии в контактную сеть на ж.д. транспорте РФ

Это связано, прежде всего, с внедрением современных электровозов переменного тока, в том числе с асинхронными тяговыми двигателями (на рисунке отмечен только выпуск массовых серий электровозов). Однако резервы далеко не исчерпаны – в мире имеются примеры возврата до 15 % и более энергии.

2. Особенности применения рекуперативного торможения на участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе. К сожалению, применение рекуперативного торможения на постоянном токе требует наличия потребителя на участке секции контактной сети, либо инверторных преобразователей на тяговых подстанциях. Регулировочные торможения имеют небольшую продолжительность, часто менее 1 минуты, в течение которой ТЭД вырабатывают значительную

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

мощность, сопоставимую с часовой мощностью электровоза или электропоезда и доходящую до 6–7 тыс. кВт. Все чаще рекуперативное торможение применяется на пассажирских электровозах. Пример – двухсистемный электровоз ЭП20, работающий на постоянном токе [4, 5]. На участке с интенсивным движением поездов принять эту мощность не составляет труда – с большой вероятностью на участке находится поезд, работающий в режиме тяги. Такая ситуация характерна для МЦК, пригородных участков Москвы. Однако на участках с менее интенсивным движением рост напряжения на токоприемнике не приводит к росту тока ТЭД, так как подстанции с диодными выпрямителями не могут осуществить передачу энергии в энергосистему. При этом на ЭПС с рекуперацией происходит отключение торможения или переход на реостатное (ступенчатый или плавный, в зависимости от типа ЭПС). В любом случае, в этой ситуации использование энергии торможения становится невозможным. В литературе имеется описание большого количества систем, предназначенных для повышения эффективности рекуперации на участках постоянного тока с небольшим объемом движения. К ним относятся:

- установка инверторов на тяговых подстанциях;
- создание электрического соединения с соседними секциями контактной сети;
- использование энергии рекуперации для питания вспомогательных машин и систем электровозов;
- Установка накопителей энергии на ЭПС (гибридизация).

Установка инверторов на тяговых подстанциях является крайне затратным мероприятием, она выполняется только на подстанциях, расположенных на участках с затяжными спусками, на которых рекуперация осуществляется постоянно и отдача энергии значительная.

Электрическое соединение на постах секционирования возможно, однако мощность передачи на больших плечах в системе 3 кВ сильно ограничена.

Оборудование подвижного состава накопителями энергии позволяет применять рекуперацию независимо от наличия потребителя в контактной сети, однако это увеличивает массу ЭПС и некоторых случаях может не повысить, а снизить энергетическую эффективность. Поэтому гибридизация с установкой накопителей применяется только в тех случаях, когда необходимо придать ЭПС какие-либо новые свойства, например автономный ход [6].

Использование энергии рекуперации для вспомогательных нужд на самом локомотиве возможно, однако вспомогательные потребители имеют небольшую мощность и не играют решающей роли в потреблении энергии рекуперации.

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

3. Использование энергии рекуперативного торможения для отопления. Энергию торможения вполне можно использовать для работы климатических установок электропоездов и пассажирских вагонов, имеющих мощность, сопоставимую с мощностью ТЭД электровозов и электропоездов, необходимо только синхронизировать их с процессом торможения, что вполне возможно реализовать с использованием современных технологий передачи информации. Идея использования системы отопления как нагрузки ТЭД при электрическом торможении не нова и применяется на некоторых типах троллейбусов и трамваев, но при реостатном торможении. В то же время современные нагреватели плохо подходят в качестве тормозных резисторов, так как рассчитаны на питание постоянным по величине напряжением, а использование штатных тормозных резисторов в качестве нагревателей не может обеспечить стабильный нагрев воздуха, вследствие чего такие системы не получили широкого распространения.

Большинство современных видов пассажирского подвижного состава имеют мощные системы электрического отопления, питающиеся от контактной сети. Пассажирские вагоны локомотивной тяги выпускаются с автономной, смешенной и централизованной высоковольтной системами электроснабжения, причем чаще используются две последние. При смешанной системе электроснабжения питание низковольтных потребителей (освещение, вентиляция, кипятильник, насосы, туалеты с управлением, иногда кондиционер и вспомогательное отопление) осуществляется от подвагонного генератора и аккумуляторной батареи по двухпроводной схеме с напряжением 52 В или 110 В постоянного тока [7–9]. Основное электрическое отопление получает питание от локомотива (электровоза или оборудованного дополнительным генератором тепловоза) по однопроводной высоковольтной подвагонной магистрали с напряжением 3 кВ как на участках как постоянного, так и переменного тока (Рис. 2).

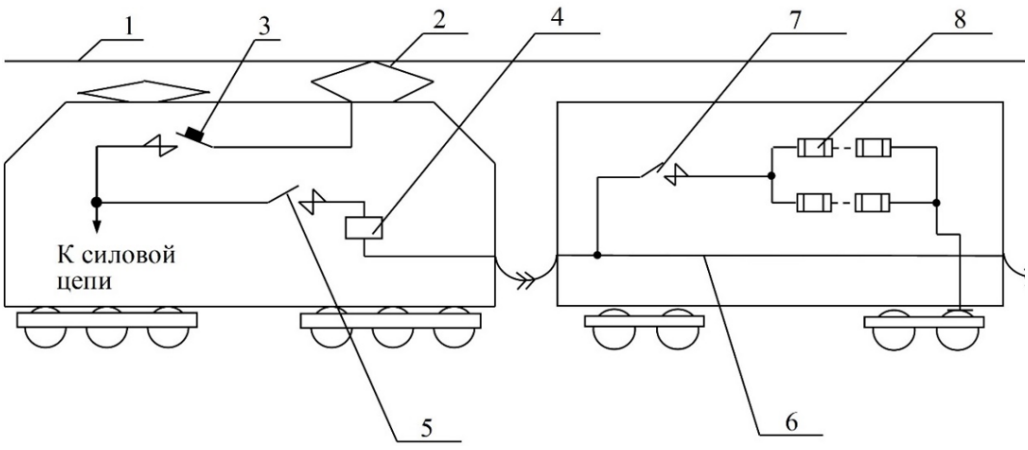


Рис. 2. Упрощенная схема высоковольтного отопления
пассажирского поезда на участке постоянного тока

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

1 – контактная сеть постоянного тока с напряжением 3000В;
2 – токоприемник электровоза;
3 – быстродействующий выключатель (БВ);
4 – токовое реле;
5 – контактор отопления; магистраль (однопроводная) с напряжением 3000В;
7 – контактор отопления на вагоне;
6 – высоковольтная однопроводная магистраль
8 – высоковольтные электронагреватели нагреватели системы отопления вагонаобщей мощностью 48 кВт

На вагонах имеется высоковольтная схема с контакторами, аппаратурой автоматики и защиты. Потребителями являются высоковольтные трубчатые электронагреватели (ТЭНы) общей мощностью 48 кВт. Наиболее часто применяется комбинированное отопление водяного типа, а ТЭНы служат для подогрева воды в котле (котел можно отапливать и углем). Сухотопочный тип системы отопления широко используется в вагонах электропоездов. Кроме описанных, в последние годы все шире стала применяться централизованная высоковольтная система отопления, при которой все энегоснабжение вагонов осуществляется от электровоза по подвагонной магистрали с использованием преобразователей, а подвагонные генераторы не устанавливаются. Так как при таком типе электроснабжения вагон может эксплуатироваться только на электрифицированных участках, котел выполняется с чисто электрическим подогревом, без топки для угля. Таким образом, пассажирский поезд нормальной составности при работающем отоплении (осенне-зимний период) всегда имеет потребители общей мощностью 800–960 кВт. На вагонах с централизованной высоковольтной системой энергоснабжения имеется также установка кондиционирования мощностью 22–30 кВт, получающая питание от магистрали с напряжением 3 кВ. Отопление вагонов работает в режиме повторно – кратковременного включения, продолжительность включения (ПВ) зависит от температуры наружного воздуха и может изменяться от 10 до 80 %. Как правило, в отопительном котле установлены термодатчики, не допускающие повышения температуры более 92 ^{0}С, так как система комбинированного водяного отопления является открытой. При понижении температуры до 85 ^{0}С ТЭНы повторно включаются. Это предотвращает закипание воды в котле. Емкость системы водяного отопления составляет 850–950 литров, в зависимости от конструкции вагона.

С точки зрения электротехники, схема электровоза в режиме рекуперации с работающей системой отопления поезда представляет собой схему постоянного тока, в которой имеется узел, соединяющий 4 ветви: ветвь ТЭД или ТЭД с преобразователями, работающих в режиме генераторов (источника); ветвь токоприемника, подключенная к контактной сети, ветвь тормозных резисторов с импульсным

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

преобразователями и ветвь отопления вагонов (Рис. 3). Входящим является ток ТЭД, работающих в режиме генераторов, а исходящими – токи рекуперации в контактную сеть Iр.кс, тормозного резистора Iрт, и ток отопления Iо.

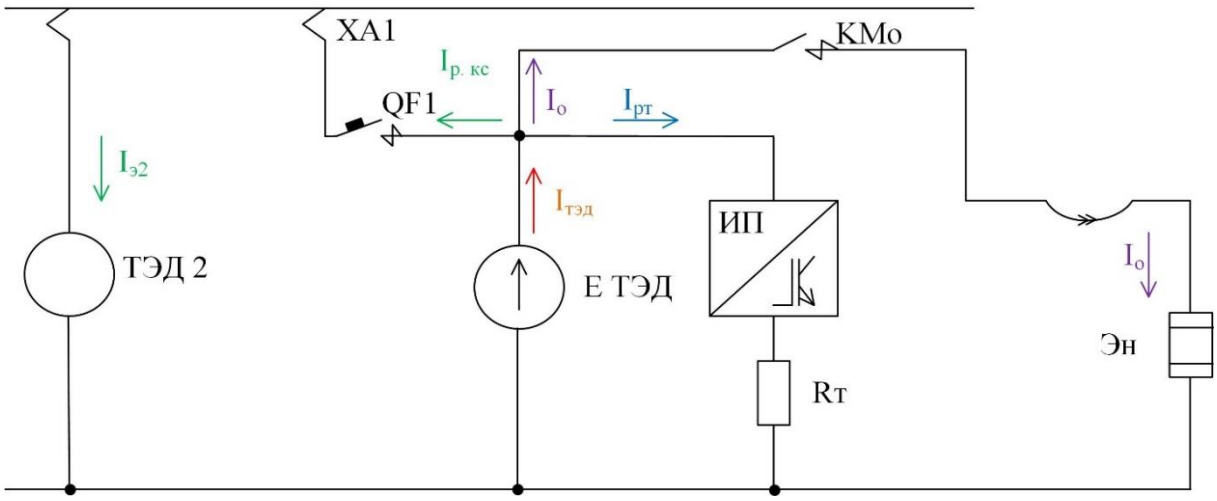


Рис. 3. Схема рекуперации:
Е ТЭД – тяговые двигатели рекуперирующего электровоза;
QF– БВ (или БК);
ИП – импульсный преобразователь;
Rт – тормозной резистор;
Эн – нагреватели системы отопления вагонов;
КМо – контактор отопления;
ТЭД2 – тяговые электродвигатели какого-либо электровоза в режиме тяги на той же секции контактной сети

При наличии в контактной сети потребителя в виде электровоза 2 (ТЭД2) с мощностью, равной или большей, чем мощность рекуперации и неработающем отоплении вагонов ток рекуперации Iр.кс имеет максимальное возможное значение, определяемой заданной машинистом рекуперирующего электровоза тормозной силой. Если электровоз 2 прекратит работу в режиме тяги, включается в работу импульсный преобразователь ИП, регулирующий ток тормозного резистора Iрт таким образом, чтобы напряжение на токоприемнике ХА1 не превышало 3,9 кВ. При этом в контактную сеть отдается максимально возможная по условию наличия потребителя энергия. Если в этот момент включить отопление, то в узле возникнет дополнительный исходящий ток отопления $I_о$, что позволит на эту же величину уменьшить ток тормозного резистора, так как входящий в узел ток определяется реализуемой тормозной силой.

Если несколько (на 5–7 %) снизить температуру срабатывания термодатчиков (термореле) котла, то это никак не скажется на работе системы отопления, однако создаст резерв для использования энергии рекуперации, используя теплоемкость системы отопления. При этом

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

защита от закипания воды в котле останется в работе. Таким образом, одновременно с режимом рекуперации от электровоза должен поступать сигнал о необходимости включения нагревателей системы отопления и циркуляционного насоса для лучшей теплопередачи. Вырабатываемая тяговыми двигателями энергия будет накапливаться в виде тепловой энергии, запасенной в системе водяного отопления. На современных электровозах, на которых при недостаточной нагрузке ток тормозных резисторов плавно увеличивается за счет работы импульсного преобразователя, эффект будет выражаться в виде уменьшения тока тормозных резисторов и увеличения тока высоковольтной подвагонной магистрали. При этом температура воды в котле повысится, и повторное включение отопления произойдет позже, что позволит уменьшить потребление энергии из контактной сети на отопление.

На вагонах с централизованной высоковольтной системой отопления можно также кратковременно увеличить интенсивность охлаждения, зарядный ток батареи, включить компрессор и другие потребители, позволяющие использовать энергию рекуперации. На современных вагонах в системе электрооборудования используется микропроцессорная система управления и диагностики (МСУД), поэтому вопрос изменения алгоритма работы контакторов решается ее простым перепрограммированием. Наиболее сложно обеспечить распознавание режима рекуперации, так как сигнал о её применении необходимо передать с электровоза (выявление повышения напряжения в подвагонной высоковольтной магистрали может говорить не только о применении рекуперации, но и просто о приближении поезда к тяговой подстанции).

Реализовать передачу сигнала от электровоза к вагонам можно с использованием технологической радиосвязи типа GSM-R [10,11], однако не все участки оборудованы такой системой. Поэтому лучше использовать систему передачи данных PLC, используемую для передачи информации по проводам ЛЭП [12]. Некоторое увеличение потребления энергии на передачу информации в данном случае не имеет значения, так как данная энергия все равно была бы рассеяна в тормозных резисторах.

Главным достоинством такой системы является отсутствие существенных затрат на модернизацию системы отопления (меняется только алгоритм). Данная система в таком виде пригодна только для пассажирских электровозов с рекуперативным торможением на постоянном токе, количество которых невелико. Чтобы использовать энергию рекуперации грузовых электровозов, необходимо разработать алгоритм выявления рекуперативного торможения и систему для его реализации, устанавливаемую на пассажирских вагонах. На электропоездах с рекуперативным торможением использовать предложенный принцип еще проще – необходимо всегда включать отопление при рекуперации (в осенне-зимний период), что легко

Received: 23.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

реализовать с помощью обычных релейных схем. При некоторых доработках систем торможения, принцип работы может использоваться и на пассажирских тепловозах, оборудованных высоковольтной подвагонной магистралью. Кроме того наличие канала связи PLC позволит решить и другие проблемы (например, обеспечение устойчивой связи между машинистом и начальником поезда на участках, не оборудованных радиосвязью, передачу телеметрической информации).

ВЫВОДЫ

1. Использование энергии рекуперации на постоянном токе затруднительно, так как связано с наличием потребителя в контактной сети.

2. В качестве дополнительного потребителя в контактной сети можно использовать систему отопления пассажирского поезда, необходимо только синхронизировать работу электронагревателей с рекуперативным торможением.

3. В качестве канала связи между электровозом и вагонами пассажирского поезда хорошие перспективы имеет система передачи данных PLC.

Библиографический список / References

1. Рекорд взят. Статья на официальном сайте газеты «Гудок» от 11.12.2011. [Rekord vzyt. Oficial'nyj sajt gazety “Gudok” ot 11.12.2011. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://gudok.ru/content2/transport/zd/884553/
2. Рекуперация в этом году бьёт рекорды. Официальный сайт газеты «Гудок». [Rekuperaciya v ehtom godu b'yot rekordy. Oficial'nyj sajt gazety “Gudok” (In Russ.)]. Доступно по: https://gudok.ru/newspaper/amp/?ID=1352219&archive=2016.10.06 Ссылка активна на 20.05.2023.
3. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Евстафьева М.В. Оценка энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т.14. – №1. – С.119–126. [Tytova TS, Yevstafiyev AM, Izvaryn MY, Yevstafiyeva MV. Assessment of energy efficiency of rail activity with the specific units of measurement application. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;14(1):119-126 (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=29112744
4. Электровоз магистральный ЭП20. Руководство по эксплуатации 3ТС.085.003 РЭ [Ehlektrovoz magistral'nyj EHP20. Rukovodstvo po ehkspluatacii 3TS.085.003 REH]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: it.su/techinfoV72.html
5. Смаглюков Д.А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20. (Учебное пособие). – М.: Российские железные дороги, 2015. – 360 с. [Smaglyukov DA. *Ustrojstvo i ehkspluataciya ehlektrovoza EHP20*. (Uchebnoe posobie). Moscow: Rossijskie zheleznye dorogi; 2015. 360 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://zlibrary-asia.se/book/3524030/9e7112

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

6. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Изварин М.Ю., Сычугов А.Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Часть 2. // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 2(81). – С. 52–55. [Titova TS, Evstaf'ev AM, Izvarin MYu, Sychugov AN. Prospects for development of traction rolling stock. part 2. *Transport of the Russian Federation.*- 2019;2(81):52-55 (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/xpzijq Ссылка активна на 31.05.2023.
7. Егоров В.П. Устройство и эксплуатация цельнометаллических пассажирских вагонов. (Учебник для техн. училищ.) – М.: Высшая школа, 1984. – 232 с. [Egorov VP. *Ustrojstvo i ehkspluataciya cel'nometallicheskikh passazhirskikh vagonov*. (Uchebnik dlya tekhn. uchilishch.) Moscow: Vysshaya shkola; 1984. 232 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://instructionsrzd.ucoz.ru/load/dlja_vagonnikov/egorov_v_p_ustrojstvo_i_ehkspluatacija_passazhirskikh_vagonov_dlja_provodnikov/11-1-0-509
8. Комаров Ю.И. Электрооборудование пассажирских вагонов локомотивной тяги нового поколения. Сб. науч. ст.: Подвижной состав 21 века: идеи, требования, проекты. – СПб: ПГУПС, 2001. – С. 114–123. [Komarov YuI. *Ehlektrooborudovanie passazhirskikh vagonov lokomotivnoj tyagi novogo pokoleniya.* Sb. nauch. st.: Podvizhnoj sostav 21 veka: idei, trebovaniya, proekty. St. Petersburg: PGUPS; 2001. pp. 114-123 (In Russ.)].
9. Зорохович А.Е., Гаврилов Я.И., Реморов А.А., Кадуба Ю.Н. Электрооборудование вагонов. (Учебник для вузов железнодорожного транспорта). – М.: Транспорт, 1982. – 367 с. [Zorokhovich AE, Gavrilov YaI, Remorov AA, Kaduba YuN. *Elektrooborudovanie vagonov*. (Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta). Moscow: Transport; 1982. 367 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 31.05.2023. Доступно по: https://search.rsl.ru/ru/record/01001104281
10. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 1. // Беспроводные технологии. – № 1(58). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast'1. *Wireless technologies*. 2020;1(58):48-56 (In Russ.)]. Доступно по: https://wireless-e.ru/gsm/gsm-r/radioset-upravleniya-chast-1/ Ссылка активна на 12.06.2023.
11. Маргарян С. Радиосеть управления и сбора данных для железнодорожных приложений. Часть 2. // Беспроводные технологии. – № 2(59). – 2020. – С. 48–56. [Margaryan S. Radioset' upravleniya i sbora dannykh dlya zheleznodorozhnykh prilozhenij. Chast' 1. *Wireless technologies*. 2020;2(59):48-56. (In Russ.)]. Ссылка активна на 12.06.2023. Доступно по: https://wireless-e.ru/application/railway/radioset-upravleniya-chast-2/
12. Шишкин Ф.Д., Бростилов С.А., Трусов В.А. Технология Power Line Communication и ее применение // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. (Материалы семинара). – 2015. – № 18. – С. 402–406. [Shishkin FD, Brostilov SA, Trusov VA. Tekhnologiya Power Line Communication i ee primenenie. *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh.* (Materialy seminara). 2015;18:402-406 (In Russ.)].

Сведения об авторах:
Кузнецов Андрей Альбертович, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Изварин Михаил Юльевич, кандидат технических наук, доцент;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Information about the authors:
Andrey A. Kuznetsov, Doctor of Technical Science, professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Mikhail Y Izvarin, Candidate of Technical Sciences, docent;
e-library SPIN 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail misha3568723@yandex.ru

Цитировать:
Кузнецов А.А., Изварин М.Ю. Использование энергии рекуперативного торможения в системе отопления пассажирских вагонов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 33–43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43

To cite this article:
Kuznetsov AA, Izvarin MYu. Use of regenerative braking energy in the passenger coaches heating system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):33-43. doi: 10.17816/transsyst20239233-43

Received: 23.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.333
DOI 10.17816/transsyst20239244-56

© А.А. Лисов, А.Г. Возмилов, Н.Ю. Кулева, А.И. Согрин, Р.А. Закиров, Р.Ю. Илимбетов
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
(Челябинск, Россия)

ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Цель: выбор тягового электродвигателя для грузового электротранспорта, работающего в условиях Арктики.

Методы: Для решения поставленной цели были рассмотрены основные характеристики существующих видов электродвигателей постоянного и переменного тока, а также приведены данные об использовании того или иного типа двигателей в современном электротранспорте.

Результаты: Сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к 2 основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами (СДПМ) и асинхронному двигателю (АД). Оба типа двигателей в полной мере подходят для решения поставленной цели. Однако, как выяснилось в последствии СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как АД в большинстве случаев используется для более тяжелого транспорта.

Заключение: В результате анализа было решено, что для электротранспорта, работающего в условиях Арктики, наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, электротранспорт специального назначения, Арктика.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, A.G. Vozmilov, N.Yu. Kuleva, A.I. Sogrin, R.A. Zakirov, R.Yu. Ilimbetov
South Ural State University (NRU)
(Chelyabinsk, Russia)

SELECTION OF A TRACTION ELECTRIC MOTOR FOR ARCTIC ELECTRIC TRANSPORT

Aim: selection of a traction motor for electric freight transport operating in the Arctic.

Methods: To achieve this aim, the main characteristics of existing types of DC and AC electric motors were considered, as well as data on the use of one or another type of motor in modern electric vehicle.

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Results: A comparative analysis of the most common motors has led to 2 main leaders - a permanent magnet synchronous motor (PMSM) and an induction motor (IM). Both types of motors are fully suitable for solving the aim. However, as it turned out later, PMSM is more often used for light vehicles, while IM in most cases is used for heavier vehicles.

Conclusion: As a result of the analysis, it was decided that for electric transport operating in the Arctic, the best option is to use an induction motor as a traction motor.

Key words: traction electric motor, special-purpose electric transport, Arctic.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают транспортные средства (ТС), которые в своем составе имеют тяговый электропривод (ТЭП). Электротранспорт стал бурно развиваться не только из-за экономических и экологических причин, но и благодаря развитию аккумуляторных батарей (АКБ), увеличения емкости АКБ и скорости их зарядки, уменьшению массогабаритных показателей и стоимости. Электромобили могут применяться как в городской среде, так и вне ее. Решение транспортных задач вне городской среды часто связано с передвижением в районах со слаборазвитой или разрушенной дорожной сетью [1–3]. При эксплуатации ТС по дорогам общего пользования, снежной целине или по местности с грунтами со слабой несущей способностью ТЭП, например, служит дополнительным источником механической энергии, увеличивающим крутящий момент колес необходимый для преодоления препятствий и подъемов.

В нашем случае, разрабатываемая в рамках комплексного проекта по разработке высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации колесная машина высокой проходимости «Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем» имеет в своем составе активный привод, состоящий из генератора, накопителя электрической энергии и электрического двигателя для привода ведущего моста.

Работа электродвигателя грузового транспорта в Арктических условиях представляет особые вызовы из-за экстремально низких температур, сильных ветров, а также наличия снега и льда. Для обеспечения надежной работы электродвигателя в таких условиях следует учитывать следующие специфические требования.

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Термическая защита. Электродвигатель должен быть способен работать в широком диапазоне температур, включая экстремально низкие значения (до минус 50 °C).

Защита от влаги, коррозии и льда. В Арктической зоне влажность и наличие льда являются обычными явлениями. Влажная и соленая атмосфера Арктики может вызывать коррозию и повреждения электродвигателя.

Сопротивление вибрации. Грузовой транспорт в Арктике сталкивается с неровностями дорог и другими сложными условиями, которые могут привести к сильным вибрациям.

Низкая мощность пуска. Желательно, чтобы двигатель имел как можно меньший пусковой ток для экономии заряда АКБ.

Энергоэффективность. В условиях Арктики доступ к энергии может быть ограниченным. Поэтому электродвигатель должен быть энергоэффективным, чтобы снизить потребление электроэнергии и обеспечить более длительное время работы от ограниченного источника энергии.

Кроме того, не менее важными показателями являются желательно низкая стоимость, высокая надежность и высокий КПД в широком диапазоне скоростей [4–6].

ОБЗОР ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На Рис. 1 приведены различные типы тяговых двигателей переменного и постоянного тока, которые потенциально могут быть применены в качестве тяговых для ТС. В связи с развитием силовых электронных коммутационных устройств и аппаратных средств стало возможным применение в качестве тяговых машины с дискретной коммутацией [7–11].

Данные машины обычно ассоциируется с двумя основными типами: бесщеточными двигателями постоянного тока (БДПТ) и вентильными реактивными электродвигателями (ВРД) [7, 8]. Машины этой категории работают по принципу машин постоянного тока, но с коммутацией при помощи специального инвертора [10].

Двигатели постоянного тока

У двигателей данного типа очень простой механизм регулирования скорости, который может быть реализован посредством обычной широтно импульсной модуляции (ШИМ) [12]. Ранее за счет наличия простого принципа регулирования скорости и малой развитости полупроводниковой техники они были широко распространены в электрифицированной транспортной отрасли, в частности, для трамваев и троллейбусов [7, 8]. Однако наличие щеточно-коллекторного узла делает работу двигателей постоянного тока менее надежной и невозможной без периодического обслуживания, поэтому данное решение не будет оптимальным для ТС,

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

находящихся в сложных климатических условиях. Кроме того, эти двигатели дольно громоздки, обладают низким КПД, низкой надежностью (из-за щеточно-коллекторного узла), и имеют низкую удельную мощность [13–17]. Поэтому применение двигателей данного типа не рекомендуется как для современного легкого электротранспорта, так и для грузового, в том числе специального назначения, работающего в условиях Арктики.

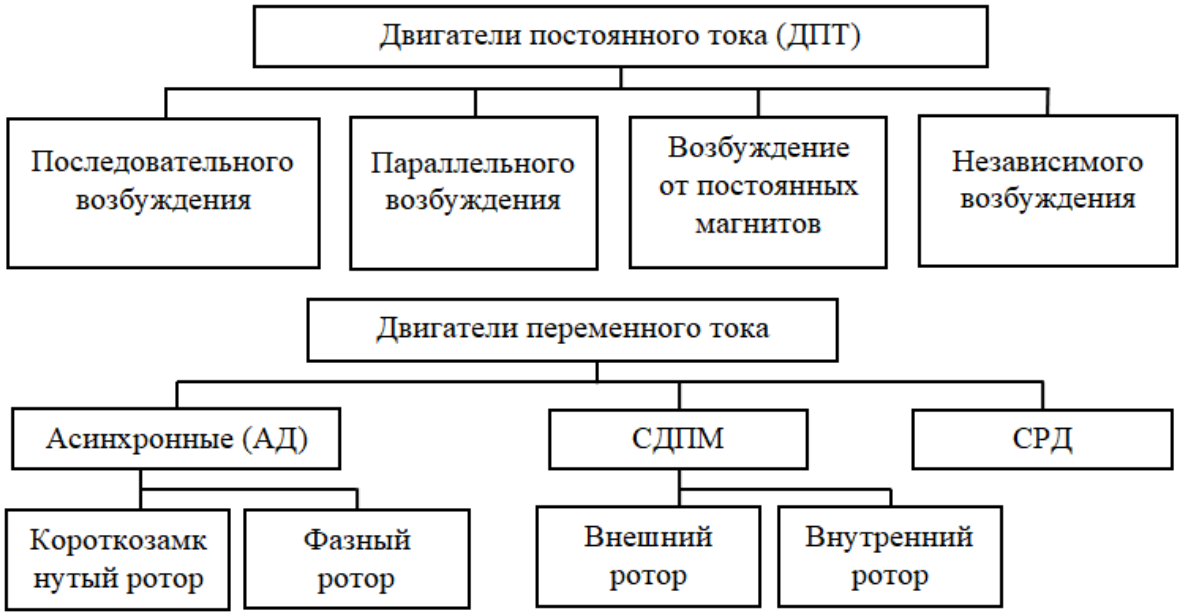


Рис 1. Тяговые двигатели постоянного и переменного тока для ТС

Источник: составлено авторами

Асинхронные двигатели

Асинхронные двигатели (АД) являются одними из наиболее широко используемых тяговых двигателей благодаря своим ключевым характеристикам, таким как низкая цена, низкие требования к обслуживанию и простота подключения при наличии трехфазной сети питания [5, 7, 8, 16–19]. В АД потери в меди ротора зависят от скольжения двигателя. Высокоэффективные АД предназначены для работы с величиной скольжения менее 3 %, что дает меньшие потери в сердечнике ротора [20].

Стоит отметить, что конкуренцию асинхронным двигателям составляют синхронные двигатели с постоянными магнитами из-за наличия у последних более высокой удельной мощности, высокого КПД и меньших потерь в роторе. Еще одним недостатком асинхронных двигателей является наличие нелинейной механической характеристики, которая сильно подвержена влиянию величины питающего напряжения как показано на Рис. 2. Если применить к двигателям данного типа требования, предъявленные к электротранспорту, работающему в Арктических

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

условиях, то он сможет удовлетворить большинству из них, кроме пункта о низкой мощности пуска.

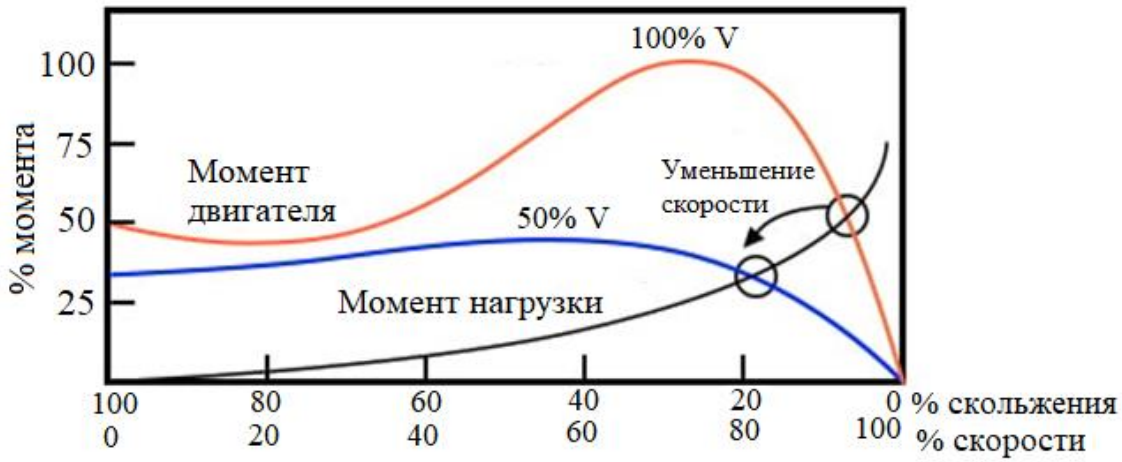


Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Источник: составлено авторами

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ)

У двигателей данного типа на роторе находятся постоянные магниты и при помощи датчиков Холла, а также системы управления с силовыми ключами (инвертора) происходит переключение обмоток статора, которое создает вращающееся магнитное поле, за которым следует ротор двигателя. Постоянные, в особенности редкоземельные, магниты обеспечивают высокую удельную мощность, небольшой вес и объем двигателя, а также высокую эффективность работы за счет снижения потерь в роторе [21]. Также эти двигатели обладает достаточной жесткостью естественной характеристики (Рис. 3) и относительной линейностью характеристик, по сравнению с асинхронным двигателем (Рис. 2).

Основными особенностями СДПМ являются:

- высокая эффективность и компактность за счет использования высокоэнергетических постоянных магнитов [15, 22];
- легкость охлаждения за счет отсутствия тока у ротора, нагревающейся частью является только статор [22];
- низкие эксплуатационные расходы, большой срок службы и надежность за счет отсутствия щеток и механических коммутаторов [8, 23];
- низкий уровень шума, поскольку не требуются механические щетки или контактные кольца [8, 22].

Данные двигатели имеют самый высокий КПД среди всех двигателей, доступных сегодня [21, 24]. Однако стоит отметить некоторые недостатки, которые включают в себя высокую стоимость из-за присутствия

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

редкоземельных магнитов, которые также могут размагничиваться под действием высоких температур [8, 20, 22] и обязательное наличие полупроводникового инвертора.

Данный тип двигателей с одной стороны отлично подходит для целей Арктического транспорта, но с другой он намного дороже АД.

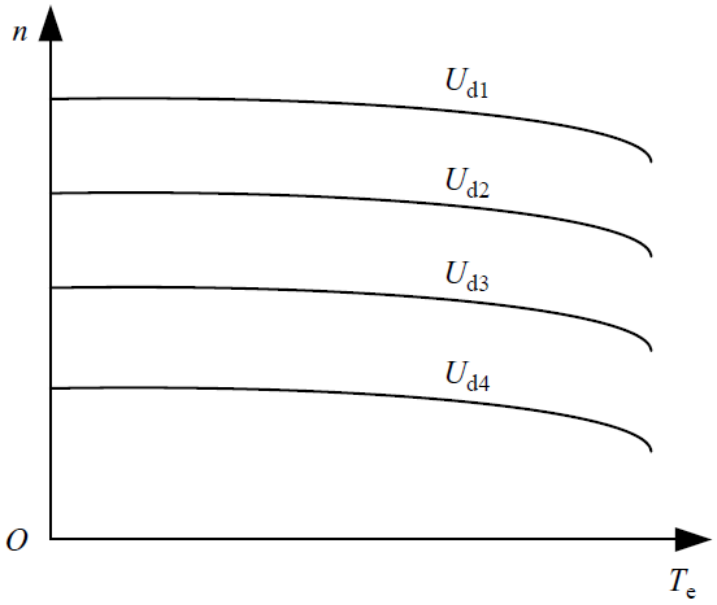


Рис. 3. Механическая характеристика BLDC-двигателя с постоянными магнитами ($U_{d1} > U_{d2} > U_{d3} > U_{d4}$)

Источник: [21]

Вентильный реактивный электродвигатель (ВРД)

Ротор и статор ВРД выполнены в виде пакетов листов магнитомягкого материала. На роторе ВРД отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Фазные обмотки находятся только на статоре. Для уменьшения трудоемкости изготовления катушек обмотки статора могут изготавливаться отдельно, а затем надеваться на полюсы статора. Простота изготовления позволяет достичь высокой надежности, устойчивости к рабочим температурам и высокого диапазона скоростей [25]. Режим постоянной мощности может быть увеличен до 6–7 раз от базовой скорости [26]. Характеристики СРД в основном зависят от конструкции полюсов ротора и требуют некоторого компромисса между постоянной мощностью и постоянным крутящим моментом [27].

Конструкция и основные варианты использования ВРД хорошо объяснены в [28, 29], из этих же исследований можно выделить несколько особенности данных двигателей:

– простая конструкция ротора без использования магнитов или обмоток, что отлично подходит для высокоскоростных приложений,

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

относительно легко охлаждается и обладает нечувствительностью к высокой температуре окружающей среды;

– невысокая цена (на уровне асинхронных двигателей).

Стоит отметить, что разработка и управление ВРД довольно сложна и как в случае с СДПМ невозможна без использования специального инвертора и датчиков положения ротора. Сильное влияние также оказывает насыщение наконечников полюсов и краевой эффект полюсов и пазов [8]. Шум, пульсация крутящего момента и вибрация являются основными проблемами этих двигателей, особенно на высоких скоростях, поскольку работа основана на последовательном возбуждении диаметрально противоположных обмоток статора.

На низкой скорости шум в основном возникает из-за резонансов, вызванных пульсацией крутящего момента, и может быть уменьшен путем соответствующего профилирования форм сигналов фазового тока [27]. При высокой скорости вращения этот шум возникает из-за резонансов радиальной вибрации [30].

Если сравнивать с ранее приведенными двигателями, то явного преимущества для электротранспорта специального назначения, он не имеет. Поэтому для принятия окончательного решения следует подробнее рассмотреть АД и СДПМ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АД И СДПМ

Выбор тягового электродвигателя основывается на нескольких факторах, включая ограничения транспортного средства, эксплуатационные требования и тип источников энергии [1, 8, 31, 32]. При проектировании привода электромобиля необходимо учитывать следующие моменты:

– тип напряжения питания тягового двигателя и способ управления им;
– максимальные возможности по скоростным характеристикам и диапазону уровней напряжения и тока в системе;
– количество тяговых электродвигателей и одно- или многоступенчатой трансмиссии в гибридной системе;
– тип накопителя энергии и его максимальная энергоемкость.

Если опираться на результаты исследований [13, 14, 18, 33], то можно прийти к выводу, что в общем случае для современного электротранспорта по удельным показателям мощности, цены, надежности и сложности управления наиболее лучшим образом подходят ранее рассмотренные АД и СДПМ.

Поскольку однозначный ответ в выборе двигателя не был получен, то на основе исследований [34–38] была составлена Табл. 1, отображающая тип двигателя, используемого в качестве тягового для легкового электротранспорта, для тяжелых кроссоверов и коммерческих

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

микроавтобусов и, наконец для автобусов и грузовых транспортных средств.

Из данных в Табл. 1 видно очевидное преобладание СДПМ - двигателей для легковых седанов и хетчбэков, в то время как на тяжелых кроссоверах уже чаще применяется асинхронный двигатель специального исполнения. Для коммерческого транспорта, такого как автобусы, а также для тяжелых грузовых транспортных средств в абсолютном большинстве используется асинхронный двигатель.

Таблица 2. Тяговые двигатели, применяемые для электромобилей и гибридов

Производитель	**Модель**	**Тяговый двигатель**
Nissan	Tino, Leaf, Altra	СДПМ
Honda	Insight, Accord, Civic	СДПМ
Toyota	Prius C & V	СДПМ
Toyota	Highlander, Avalon	СДПМ
Toyota	Camry	СДПМ
Ford	Fusion SE Hybrid	СДПМ
Ford	C Max Hybrid SEL	СДПМ
Hyundai	Blueon	СДПМ
Chevrolet	Volt & Energi	СДПМ
Renault	Kangoo	АД
Chevrolet	Silverado	АД
Daimler Chrysler	Durango	АД
Tesla	Roadster	АД
Honda	Fit EV	АД
Toyota	Reva4	АД
REVA	NXR	АД
Ford	Focus Electric	АД
Ford	Transit Connect	АД
GM	EV1	АД
BMW	X5	АД
Volkswagen	e-Crafter	СДПМ
Volvo	FM Electric (грузовик)	АД
ЛиАЗ	ЛиАЗ-6274.20 «e-Citymax 18» (автобус)	АД
КамАЗ	КАМАЗ-6282 (автобус)	АД
VolgaBus	Ситиритм 12 ELF	АД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, сравнительный анализ наиболее распространенных двигателей привел к двум основным лидерам – синхронному двигателю с постоянными магнитами и асинхронному двигателю.

Как было сказано ранее, тяговый электропривод, работающий в тяжелых арктических условиях, должен обладать рядом защит от внешних условий и высокой ремонтопригодностью. Оба типа двигателей в полной мере подходят для данных задач в виду возможности исполнения закрытого корпуса и простоты конструкции.

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Обзор применяемых в электротранспорте двигателей показал, что СДПМ чаще применяется для легкового транспорта, в то время как асинхронный двигатель используется для более тяжелого транспорта.

Вышеперечисленные факты, а также более привлекательная цена позволяют заключить, что для поставленной цели наиболее оптимальным вариантом в качестве тягового электродвигателя стоит использовать асинхронный двигатель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации» с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по Соглашению №075-11-2021-058 от 25.06.2021г. (Идентификатор государственного контракта 000000S407521QLY0002) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Акционерным обществом «Автомобильный завод «УРАЛ» в кооперации с Головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». НИОКТР выполнен в организации Головного исполнителя НИОКТР.

Авторы заявляют, что:

1. у них нет конфликта интересов;
2. настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Chan CC, Bouscayrol A, Chen K. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. IEEE transactions on vehicular technology. 2009;2;59(2):589-98. doi: 10.1109/TVT.2009.2033605

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Ehsani M, Rahman KM, Toliyat HA. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on industrial electronics. 1997 Feb;44(1):19-27. doi: 10.1109/41.557495

3. Boldea I, Tutelea LN, Parsa L, Dorrell D. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014 Jan 21;61(10):5696-711. doi: 10.1109/TIE.2014.2301754

4. Hashemnia N, Asaei B. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In2008 18th International Conference on Electrical Machines 2008 Sep 6 (pp. 1-5). IEEE. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157

5. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular technology. 2006 Nov 13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/TVT.2006.878719

6. Yildirim M, Polat M, Kürüm H. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. In2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2014 Sep 21 (pp. 218-223). IEEE. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980715

7. Finch JW, Giaouris D. Controlled AC electrical drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008 Jan 31;55(2):481-91. doi: 10.1109/TIE.2007.911209

8. Ehsani M, Gao Y, Emadi A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. CRC press; 2003.

9. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. Oxford,[Eng.]; New York: Oxford University Press; 1998.

10. Abu-Rub H, Iqbal A, Guzinski J. High performance control of AC drives with Matlab/Simulink. John Wiley & Sons; 2021 Apr 6.

11. Leonhard W. Controlled AC drives, a successful transition from ideas to industrial practice. Control Engineering Practice. 1996 Jul 1;4(7):897-908. doi: 10.1016/0967-0661(96)00087-1

12. Gupta V. Working and analysis of the H-bridge motor driver circuit designed for wheeled mobile robots. In 2nd International Conference on Advanced Computer Control 2010 Mar 27. 2010;3:441-444. IEEE. doi: 10.1109/ICACC.2010.5486818

13. Chang L. Comparison of AC drives for electric vehicles-a report on experts' opinion survey. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 1994;9(8):7-11. doi: 10.1109/62.311235

14. Zeraoulia M, Benbouzid ME, Diallo D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular technology*. 2006;13;55(6):1756-64. doi: 10.1109/62.311235

15. Chan CC. An overview of electric vehicle technology. Proceedings of the IEEE. 1993;81(9):1202-13. doi: 10.1109/5.237530

16. De Santiago J, Bernhoff H, Ekergård B, Eriksson S, Ferhatovic S, Waters R, Leijon M. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. IEEE Transactions on vehicular technology. 2011;61(2):475-84. doi: 10.1109/TVT.2011.2177873

17. Lungoci CM, Georgescu M, Calin MD. Electrical motor types for vehicle propulsion. In 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2012 May 24. 2012:635-640. IEEE. doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231985

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

18. Chan CC. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2002;90(2):247-75. doi: 10.1109/5.989873
19. Pellegrino G, Vagati A, Boazzo B, Guglielmi P. Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples. IEEE Transactions on industry applications. 2012 Nov 15. 2012;48(6):2322-32. doi: 10.1109/TIA.2012.2227092
20. Bilgin B, Emadi A. Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system. IEEE Power Electronics Magazine. 2014 Jun 23. 2014;1(2):10-7. doi: 10.1109/MPEL.2014.2312275
21. Miller TJ, Rabinovici R. Back-EMF waveforms and core losses in brushless DC motors. IEE Proceedings-Electric Power Applications. 1994 May 1. 1994;141(3):144-54. doi: 10.1049/ip-epa:19941080
22. Emadi A, editor. *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. CRC press; 2017 Dec 19.
23. Nian X, Peng F, Zhang H. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014 Jan 14. 2014;61(10):5798-808. doi: 10.1109/TIE.2014.2300059
24. Jahns TM. Motion control with permanent-magnet AC machines. *Proceedings of the IEEE*. 1994 Aug. 1994;82(8):1241-52. doi: 10.1109/5.301686
25. Kiyota K, Sugimoto H, Chiba A. Comparing electric motors: An analysis using four standard driving schedules. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2014 Apr 23. 2014;20(4):12-20. doi: 10.1109/MIAS.2013.2288380
26. Rahman KM, Fahimi B, Suresh G, Rajarathnam AV, Ehsani M. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues. IEEE transactions on industry applications. 2000 Jan. 2000;36(1):111-21. doi: 10.1109/28.821805
27. Zhu ZQ, Howe D. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007 Apr 30. 2007;95(4):746-65. doi: 10.1109/JPROC.2006.892482
28. Miller TJ, editor. *Electronic control of switched reluctance machines*. Elsevier; 2001 May 18.
29. Miller TJ. Switched reluctance motors and their control. 1993 Jan.
30. Cameron DE, Lang JH, Umans SD. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992 Nov. 1992;28(6):1250-5. doi: 10.1109/28.175275
31. Rajashekara K. Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*. 2013 Apr 23. 2013;1(1):3-10.
32. Hesla E. Electric propulsion [history]. *IEEE Industry applications magazine*. 2009 Jun 12. 2009;15(4):10-3.
33. Kumar L, Jain S. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014 Jan 1. 2014;29:924-40. doi: 10.1016/j.rser.2013.09.014
34. Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Лисов А.А., Илимбетов Р. Ю. Разработка и моделирование пропорционально-интегрального регулятора для электронного дифференциала электротрактора сельскохозяйственного назначения // Вестник Башкирского Государственного Аграрного Университета. – 2022. – №. 2(62). – С. 119–124. [Vozmilov AG, Urmanov VG, Lisov AA, Ilimbetov RYu. Development and simulation of the proportional and integral regulator for the

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

electronic differential of an electric farm tractor. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2022;2(62):119-124 (Russ., Engl.)]. doi: 10.31563/1684-7628-2022-62-2-119-124

35. Gozálvez J, Sepulcre M, Bauza R. IEEE 802.11 p vehicle to infrastructure communications in urban environments. IEEE Communications Magazine. 2012 May 7. 2017;50(5):176-83. doi: 10.1109/MCOM.2012.6194400

36. Kenney JB. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States. Proceedings of the IEEE. 2011 Jun 16. 2011;99(7):1162-82. doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790

37. Maddox J, Sweatman P, Sayer J. Intelligent vehicles+ infrastructure to address transportation problems–a strategic approach. In 24th international technical conference on the enhanced safety of vehicles (ESV) 2015 Jun.

38. Конев В.В., Карнаухов Н.Н., Мерданов Ш.М., Половников Е.В. Электрический привод строительно-дорожных машин // Архитектура, строительство, транспорт. – 2022. – № 3(101). – С. 65–73. [Konev VV, Karnaukhov NN, Merdanov ShM, Polovnikov EV. Electric drive of road construction machines. *Architecture, Construction, Transport*. 2022;3(101):65-73. (In Russ.)]. doi: 10.31660/2782-232X-2022-3-65-73

Сведения об авторах:
Лисов Андрей Анатольевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Возмилов Александр Григорьевич, профессор, д.т.н;
eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;
E-mail: vozmiag@rambler.ru

Кулева Надежда Юрьевна, научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;
E-mail: kulevani@susu.ru

Согрин Андрей Игоревич, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;
E-mail: sogrinai@susu.ru

Закиров Рамиль Агзамович, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;
E-mail: zakirovra@susu.ru

Илимбетов Рафаэль Юрикович, доцент, к.т.н;
eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;
E-mail: ilimbay@yandex.ru

Information about the authors:
Andrey A. Lisov, postgraduate student;
eLibrary SPIN 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;
E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Alexander G. Vozmilov, Professor, Doctor of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;
E-mail: vozmiag@rambler.ru

Nadezhda Yu. Kuleva, Research associate;
eLibrary SPIN: 2385-8383; ORCID: 0000-0002-6609-1115;
E-mail: kulevani@susu.ru

Andrey I. Sogrin, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 8424-0573; ORCID: 0000-0001-7042-3664;
E-mail: sogrinai@susu.ru

Ramil A. Zakirov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 6877-0902; ORCID: 0009-0002-8330-1062;
E-mail: zakirovra@susu.ru

Rafael Yu. Ilimbetov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 8465-5500; ORCID: 0000-0003-1634-9242;
E-mail: ilimbay@yandex.ru

Цитировать:
Лисов А.А., Возмилов А.Г., Кулева Н.Ю. и др. Выбор тягового электродвигателя для Арктического электротранспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 44–56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56

To cite this article:
Lisov AA, Vozmilov AG, Kuleva NYu, et al. Selection of a traction electric motor for Arctic electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):44-56. doi: 10.17816/transsyst20239244-56

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

УДК [UDC] 656.21
DOI 10.17816/transsyst20239257-65

© А.В. Сугоровский[1], А.В. Сугоровский[2]
[1]АО «Институт экономики и развития транспорта»
(Москва, Россия)
[2]Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ТИПОВОЙ ИМИТАЦИОННЫЙ ПАССАЖИРСКИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ, УЗЛОВ И СТАНЦИЙ

Цель: создание типового имитационного модуля пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической универсальными приемами.

Методы: для достижения поставленной цели использованы методы имитационного моделирования и математической статистики.

Результаты: в типовом имитационном модуле пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической реализовано: прибытие и отправления поездов, перестановка составов на перронные пути с путей пассажирской технической станции по расписанию; передвижения по горловине поездных и маневровых локомотивов; вариантность технологии, выбор приоритетной секции прибытия, в зависимости от ее свободности и с учетом занимаемых в горловине каналов, выполнением операции; диспетчерское регулирование, а именно заблаговременная подача на перронные пути с путей пассажирской технической станции в момент свободности горловины; расчет минимального количества маневровых локомотивов.

Заключение: создание типового имитационного пассажирского модуля позволит в полном соответствии с технологией и реализацией диспетчерского регулирования моделировать работу пассажирских и пассажирских технических станций, а также работу с пассажирскими поездами на любых других станциях сети железных дорог.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пассажирская станция, горловина, пассажирская техническая станция, система ИМЕТРА.

RUBRIC 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© A.V. Sugorovsky[1], A.V. Sugorovsky[2]
[1]JSC Institute of economy and development of transport
(Moscow, Russia)
[2] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

A TYPICAL SIMULATION PASSENGER MODULE FOR A COMPREHENSIVE STUDY OF RAILWAY DIRECTIONS, JUNCTIONS AND STATIONS

Aim: to create a typical simulation module of a passenger station in interaction with a passenger technical universal techniques.

Methods: methods of simulation modeling and mathematical statistics were used to achieve this goal.

Results: as a result of processing empirical data using the Statistics application package, the sample mean, standard deviation and coefficient of variation were obtained. In the course of various experiments with the model of the functioning of the transport system, the necessary volumes of work for the development of promising volumes of work were determined: track development and the number of shunting locomotives.

Conclusion: in a typical simulation module of a passenger station, in cooperation with a passenger technical station, the following was implemented: arrival and departure of trains, rearrangement of trains on the apron tracks from the tracks of a passenger technical station according to the schedule; movement along the neck of train and shunting locomotives; the variability of technology, the choice of the priority arrival section, depending on its freedom and taking into account the channels occupied in the neck, the execution of the operation; dispatcher regulation, namely, advance delivery to the apron tracks from the tracks of the passenger technical station at the time of the neck's freedom; calculation of the minimum number of shunting locomotives. Conclusion: the creation of a typical simulation passenger module will allow, in full accordance with the technology and implementation of dispatching regulation, to simulate the operation of passenger and passenger technical stations, as well as work with passenger trains at any other stations of the railway network.

Key words: simulation modeling, passenger station, neck, passenger technical station, IMATRA system

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года в рамках научного обеспечения формирования единого транспортного пространства России на базе рационального развития транспортной инфраструктуры предусмотрено «*проведение имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры (в особенности, проектов развития крупных транспортных узлов);….. комплексное исследование на моделях функционирования проектируемых транспортных объектов с выдачей их реальной пропускной способности, «узких мест» и показателей работы, а также разработка предложений по корректировке проектов на основании имитационной экспертизы*» [1]. Эти задачи решаются с помощью программного обеспечения «Имитационное моделирование работы железнодорожных направлений и узлов (ИМ ЖНУ)», система ИМЕТРА [2–6].

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

В Транспортной стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года обозначена цель: «*Повышение мобильности населения и развитие внутреннего Туризма*» и приведены перспективные размеры перевозок пассажиров различными видами транспорта [7]. На Рис. 1 приведена диаграмма железнодорожных перевозок пассажиров в дальнем следовании с динамикой по годам.

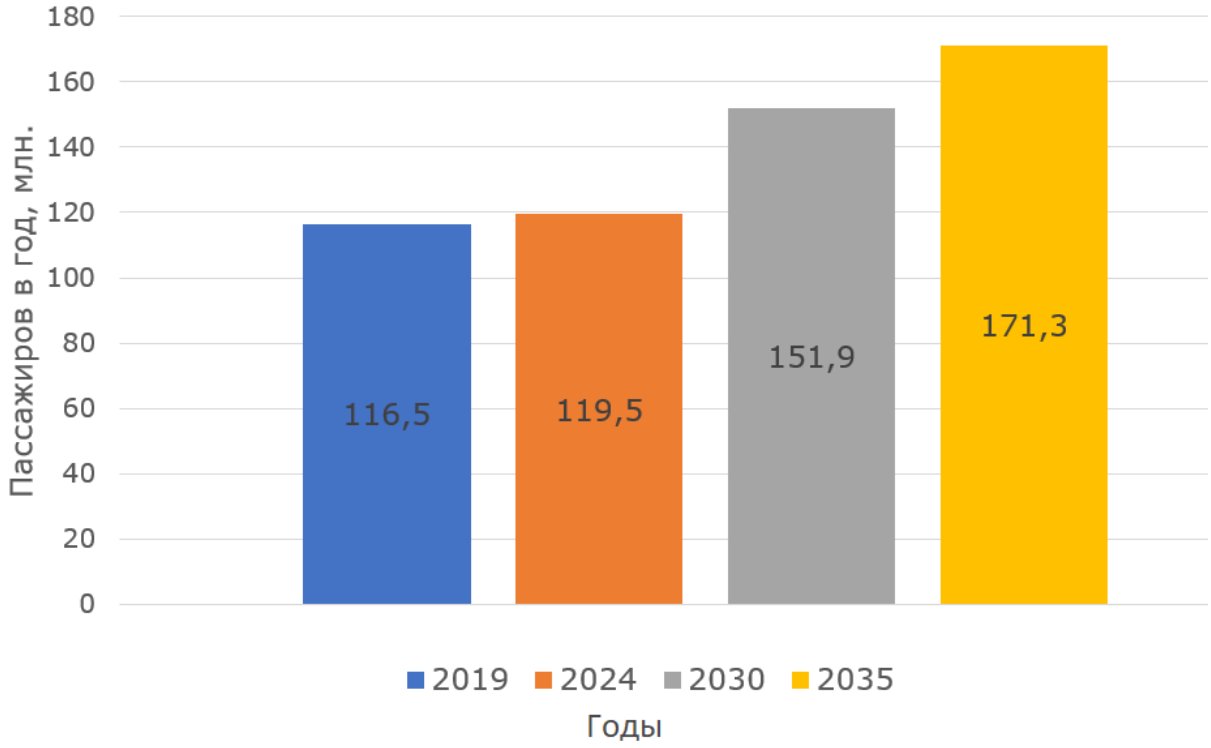


Рис. 1. Железнодорожные перевозки пассажиров в дальнем следовании с динамикой по годам

Из Рис. 1 видно, что с 2024 по 2035 год прогнозируется увеличение числа перевезенных пассажиров более чем на 50 миллионов человек в год. В связи с ростом размеров перевозок пассажиров при анализе работы железнодорожных узлов и полигонов возникает задача установления количества поездов, которые получится дополнительно принять на рассматриваемые пассажирские станции (ПС) в соответствии с графиком движения поездов (ГДП), а при реконструкции – определение необходимого и достаточного технического и технологического обеспечения пассажирской и пассажирской технической станций (ПТС) [8].

На сети железных дорог России в настоящее время по характеру выполняемой работы расположено 54 крупных пассажирских станций, в том числе 11 тупикового типа (по схеме путевого развития).

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

Поскольку на пассажирских станциях тупикового типа имеет место большая загрузка единственной горловины станции, в которой выполняются все операции по приему, отправлению и маневровым передвижениям поездов различных категорий, большое число враждебных маршрутов, вызванное встречными передвижениями организованных поездов, маневровых составов, поездных и маневровых локомотивов, горловина оказывает существенное влияние на загрузку других устройств станции. Для корректного отображения загрузки горловины и занятия перронных путей необходимо точно и технологически верно прописать все виды передвижений по станции и ее горловине [9]. Эта задача достаточно трудоемкая и сопряжена с риском ошибок, поэтому создание типового модуля работы пассажирской станции тупикового типа во взаимодействии ее с примыкающей к ней пассажирской технической станцией актуальна [10].

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ТИПОВОГО ИМИТАЦИОННОГО ПАССАЖИРСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ, УЗЛОВ И СТАНЦИЙ

Для достижения поставленной цели: создание типового имитационного модуля пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской-технической универсальными приемами, требуется решить ряд задач:

- обеспечить прибытие и отправления поездов, а также перестановку составов на перронные пути с путей ПТС по расписанию, используя принципы макромоделирования;
- прописать занятие горловины подачей/уборкой поездных и маневровых локомотивов;
- обеспечить определение минимального количества маневровых локомотивов;
- реализовать диспетчерское регулирование: заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины;

Прибытие поездов по расписанию реализуется достаточно просто (как в системе ИМЕТРА, так и в других подобных программах, созданных для имитационного моделирования) [11–14]. На Рис. 2 представлены способы задания времени отправления поездов по расписанию при макромоделировании, а также погрешности, возникающие при их реализации [15].

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

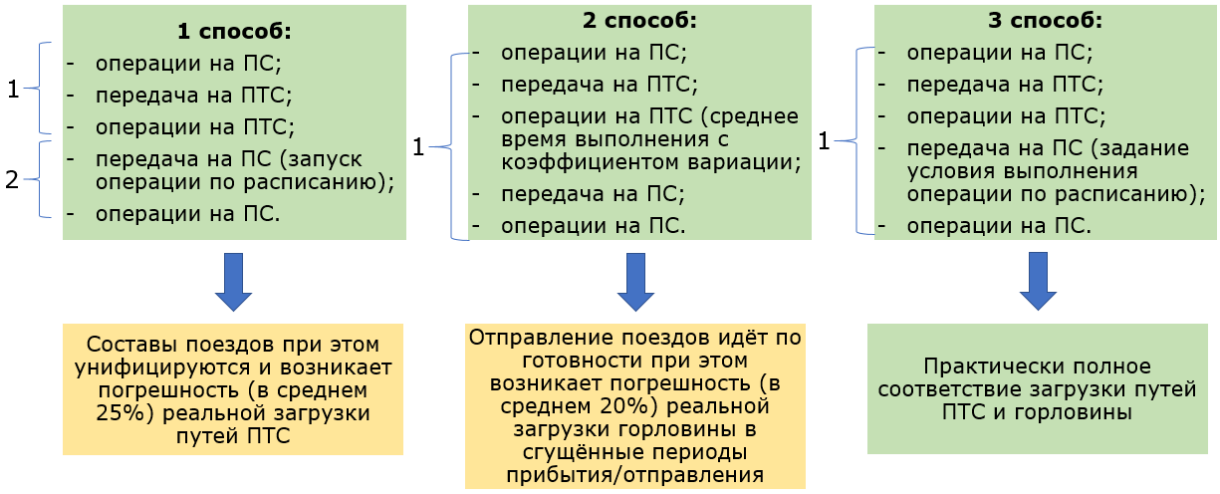


Рис. 2. Способы задания отправления поездов
по расписанию при макромоделировании

По первому способу отправления поездов осуществляется через запуск операции по расписанию, при этом в одной цепочке операций прописывается занятие путей ПС, передача на пути ПТС и занятие путей пассажирской-технической станции, на которой выполняется весь комплекс работ по подготовке составов в очередной рейс. Во второй цепочке операций прописывается передача составов на перронные пути пассажирской станции с путей ПТС. Поскольку операции прописываются двумя цепочками, составы поездов при этом унифицируются. В действительности составы поездов, обращающихся на различных направлениях, имеют свою составность и композицию, поэтому при первом способе возникает погрешность (в среднем 25 %) реальной загрузки путей ПТС.

Во втором способе задания отправления поездов по расписанию все операции с составами прописываются в одной цепочке, что позволяет проследить оборот состава, закрепив соответствие прибывшего и отправленного поездов. При этом принимается среднее время занятия путей ПТС с заданным коэффициентом вариации, что приводит к погрешности (в среднем 20 %) реальной загрузки горловины в сгущенные периоды прибытия/отправления пассажирских поездов.

Поскольку первый и второй способы имеют погрешности, предлагается третий вариант, при котором все операции прописываются в одной цепочке, а передача составов на пассажирскую станцию прописывается через задание специального условия выполнения операции по расписанию.

Многочисленные эксперименты с моделями показали, что для отправления поездов строго по расписанию, а не по готовности в системе ИМЕТРА целесообразно ввести вспомогательную категорию, которая

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

будет «рождаться» в момент отправления поезда по расписанию. При этом с вспомогательной категорией в парк будет поступать локомотив и уже с ним продолжится выполнение операций по цепочке. Это решение является типовым для любой пассажирской и пассажирской-технической станции, моделируемой в программе.

Реализация диспетчерского регулирования, а именно заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины реализуется аналогичным образом, т.е. через «рождение вспомогательной категории.

Достоверно прописать занятие горловины подачей/уборкой поездных и маневровых локомотивов, а также поездными и маневровыми передвижениями получится через дополнительное отображение секционирования путей станции. При этом также удастся прописать выбор приоритетной секции прибытия для каждой категории поездов.

На Рис. 3 представлено схематическое отображение типового модуля, разработанного в «ИМ ЖНУ» для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций.

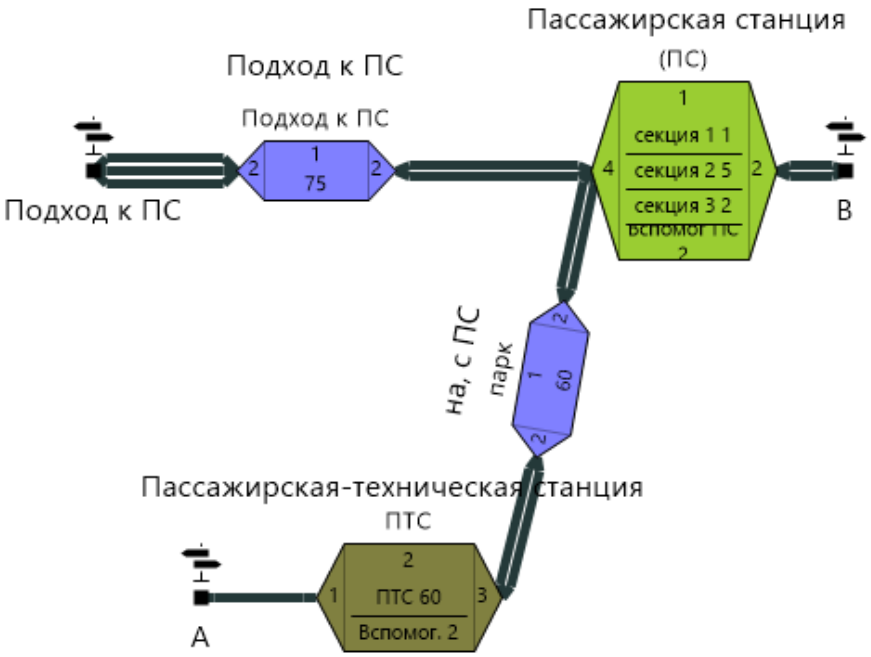


Рис. 3. Схематическое отображение типового модуля пассажирской станции тупикового типа во взаимодействии с пассажирской-технической станцией

На Рис. 3 видно, что типовой имитационной модуль пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской технической представлен в виде четырех «бункеров», при этом «бункер» пассажирской станции поделен на три основных секции, что позволяет более детально прописать занятие горловины и одну вспомогательную, обеспечивающую прием вспомогательной категории. Пассажирская техническая станция

Received: 23.04.2023 Revised: 31.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 23.04.2023 Одобрена: 31.05.2023 Принята: 30.06.2023

представлена двумя «бункерами», позволяющими анализировать ее работу при макромоделировании. Стоит отметить, что при необходимости более детального анализа, пассажирская техническая станция может быть разделена на дополнительные парки («бункеры»).

ВЫВОДЫ

В типовом имитационном модуле пассажирской станции во взаимодействии с пассажирской-технической реализовано:

- прибытие поездов по расписанию;
- занятие горловины подачей/уборкой поездных локомотивов;
- занятие горловины передвижениями маневровых локомотивов;
- вариантность технологии: выбор секции прибытия, в зависимости от ее свободности и с учетом занимаемых в горловине каналов, выполнением операции;
- выбор приоритетной секции прибытия;
- перестановка составов на перронные пути с путей ПТС по расписанию;
- диспетчерское регулирование: заблаговременная подача на перронные пути с путей ПТС в момент свободности горловины;
- определение минимального количества маневровых локомотивов
- отправление поездов с пассажирской станции по расписанию.

Таким образом, создание типового имитационного пассажирского модуля позволяет в полном соответствии с технологией и реализацией диспетчерского регулирования моделировать работу пассажирских и пассажирских технических станций, а также работу с пассажирскими поездами на любых других станциях сети железных дорог, это будет способствовать проведению качественной имитационной экспертизы инвестиционных проектов развития транспортной инфраструктуры, в том числе проектов развития крупных транспортных узлов.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 N 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года». [Order of the Government of the Russian Federation of 17 June 2009. “On the Strategy for the Development of railway Transport in the Russian Federation until 2030”. (In Russ)]. Дата обращения: 25.04.2023. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010?ysclid=lgxcf09a2k884722893

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Kozlov PA, Kolokolnikov VS, Kopylova EV. About simulation modeling and simulation systems. *Transport of the Urals*. 2019;1(60):3-6. doi: 10.20291/1815-9400-2019-1-3-6

3. Козлов П.А., Тушин Н.А., Пермикин В.Ю., Слободянюк И.Г. Технология макромоделирования транспортных узлов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 3–6. [Kozlov PA, Tushin NA, Permikin VYu, Slobodyanyuk IG. Transport hub macromodelling technology. *Transport of the Urals*. 2014;3(42):3-6. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22369704 Ссылка активна на: 25.04.2023.

4. Kozlov PA, Vakulenko SP, Kozlova VP. Railway junctions from the standpoint of a systematic approach. *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. 2021;3(83):124-130. doi: 10.46973/0201-727X_2021_3_124

5. Kolokolnikov VS, Slobodyanyuk IG. Technology of polygons macromodelling. *Transport of the Urals*. 2019;3(62):48-51. doi: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51

6. Slobodyanyuk IG. Functional approach to modeling of transport systems. *Transport of the Urals*. 2017;2(53):96-101. doi: 10.20291/1815-9400-2017-2-96-101

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». [Order of the Government of the Russian Federation of 27 November 2021. “On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035” (In Russ)]. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents Дата обращения: 25.04.2023.

8. Бородин А.Ф., Николаев К.Ю., Петров А.С. Принципы технологии грузового движения в Санкт-Петербургском железнодорожном узле при перспективной организации пассажирских перевозок // Бюллетень ученого совета АО "ИЭРТ". – 2020. – № 5. – С. 60–67. [Borodin AF, Nikolaev KY, Petrov AS. Principles of freight trains technology with perspective ridership operation at St. Petersburg railway junction. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2020;5:60-67. (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=49301204 Ссылка активна на: 25.04.2023.

9. Покровская О.Д., Аль-Шумари А.С., Кукушкина Я.В., Шманев Т.М. Пассажирский комплекс железных дорог: учеб. пособие. – СПб: ПГУПС, 2023. [Pokrovskaya OD, Al-Shumari AS, Kukushkina YaV, Shmanev TM. *Passazhirskiy kompleks zheleznykh dorog: schoolbook*. St. Petersburg: PGUPS; 2023. (In Russ.)].

10. Borodin AF, Kravchenko AA, Nikolaev KY, et al. Metody gibridnoy tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya pri vybore variantov rekonstruktivnykh meropriyatiy po razvitiyu zheleznodorozhnykh napravleniy i krupnykh uzlov. Proceedings of the Fourteenth International Conference “Management of Large-scale Systems Development (MLSD'2021)”. 2021:963-971. doi: 10.25728/4783.2021.67.10.001

11. Дмитриев Е.О. Методы обоснования вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 26–38. [Dmitriev EO. Substantiation methods of alternative technological modes of railway network polygons operation. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:26-38. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 25.04.2023. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=46279751

12. Бородин А.Ф., Панин В.В., Рубцов Д.В., Щепанов С.Л. Развитие и интеграция информационных технологий управления перевозочным процессом при создании Цифровой Генеральной схемы развития сети ОАО «РЖД» в рамках проекта «Цифровая железная дорога» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». – 2021. – № 6. – С. 5–14. [Borodin AF, Panin VV, Rubtsov DV, Shchipanov SL. Development

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

and integration of information technologies for managing transportation process of the digital railway project in creating the digital master scheme for Russian railways network development. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:5-14. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46279749 Ссылка активна на: 25.04.2023.

13. Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610127/ 10.01.2023. Бюл. № 1. Покровская О.Д., Марченко М.А. Имитационная модель движения скоростных и пассажирских поездов по железнодорожной линии. [Certificate of state registration of a computer program RUS № 2023610127/ 10.01.2023. Byul. № 1. Pokrovskaya OD, Marchenko MA. Simulation model of the movement of high-speed and passenger trains on a railway line. (In Russ.)]. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50132969 Дата обращения: 25.04.2023.
14. Zhuravleva NA. *Simulation modeling of changes in demand for rail transportation. Proceedings of the Twelfth International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry.* INTERAGROMASH 2019. 2019;403:12-23. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012230
15. Petrov AS, Dmitriev EO, Nikolaev KY. Tipovyye moduli imitatsionnogo rascheta krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov. Proceedings of the Twelfth International Conference Managing the Development of Large-scale Systems (MLSD'2019). 2019:633-644. doi: 10.25728/mlsd.2019.2.0633

Сведения об авторах:
Сугоровский Артём Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru
Сугоровский Антон Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Information about the authors:
Artyom V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN:5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru
Anton V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN:6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Цитировать:
Сугоровский А.В., Сугоровский А.В. Типовой имитационный пассажирский модуль для комплексного исследования железнодорожных направлений, узлов и станций // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 57–65. doi: 10.17816/transsyst20239257-65
To cite this article:
Sugorovsky AV, Sugorovsky AV. A typical simulation passenger module for a comprehensive study of railway directions, junctions and stations. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):57-65. doi: 10.17816/transsyst20239257-65

Received: 23.04.2023 **Revised: 31.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 23.04.2023 **Одобрена: 31.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК 625.089.21
DOI 10.17816/transsyst20239266-82

© Н.А. Федосеев, В.А. Свальбова, С.В. Алексеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ КАРТОГРАММЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Обоснование: Картограмма фрезерования является техническим заданием для машиниста дорожной фрезы.

Цель: Автоматизация процесса составления картограммы фрезерования.

Материалы и методы: Алгоритм поиска наилучшего варианта основан на методе обобщенного приведенного градиента. В качестве программного комплекса используется MS Excel. Источниками ограничений являются требования нормативных документов к качеству проведения работ по фрезерованию.

Результаты: Составленная модель учитывает условия для обеспечения поверхностного водоотвода, а также ограничения, предусмотренные строительными правилами. В качестве целевой функции принято расхождение фактической глубины реза с предпочтительной. Проведен анализ результатов решения и дано сопоставление ручного и автоматизированного расчетов.

Выводы: Использование описанного в статье алгоритма позволяет сократить трудозатраты на составление картограммы в два раза. Аналогично снижается степень отклонения задаваемой глубины реза от целевой, что приводит к снижению объемов перерасхода материалов при дальнейших работах.

Ключевые слова: ремонт улично-дорожной сети, оптимизационная модель, математическое моделирование, фрезерование, ремонт покрытия, картограмма, MS Excel.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, V.A. Svalbova, S.V. Alekseev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

AUTOMATED ALGORITHM FOR DRAWING UP A MILLING CARTOGRAM

Background: The milling cartogram is a technical task for the driver of a road milling cutter.

Aim: Automation the process of drawing up a milling cartogram.

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Materials and methods: The algorithm for finding the best option is based on the generalized reduced gradient method. MS Excel is used as a software package. The sources of restrictions are the requirements of regulatory documents for the quality of milling operations.

Results: The compiled model considers the conditions for ensuring surface drainage, as well as the restrictions provided for by the building regulations. The discrepancy between the actual cutting depth and the preferred one is accepted as the objective function. The analysis of the results of the solution is carried out and a comparison of manual and automated calculations is given.

Conclusion: The use of the algorithm described in the article makes it possible to reduce the labor costs for drawing up a cartogram by half. Similarly, the degree of deviation of the specified cutting depth from the target is reduced, which leads to a decrease in the amount of overspending of materials during further work.

Key words: repair of the road network, optimization model, mathematical modeling, milling, coating repair, cartogram, MS Excel.

ВВЕДЕНИЕ

В период содержания автомобильной дороги и проведения текущих ремонтов крайне распространенной задачей является выравнивание покрытия в продольном и поперечном направлениях. Одной из основных дорожно-строительных машин, позволяющих производить выравнивание покрытия при проведении работ по ремонту улично-дорожной сети (УДС) и автомобильных дорог, является дорожная фреза. В качестве технического задания оператору машины выдается картограмма с указанными на ней глубиной зарезания и направлением и величиной уклона фрезерного барабана в контрольных точках [1]. Для составления картограммы требуется изначально наметить траекторию движения копирной лыжи машины и расположить на ней точки, которые должны обладать тремя характеристиками – глубиной зарезания, величиной поперечного уклона и его направлением. Данные линии называются базовыми линиями (БЛ) – относительно них идет ориентация рабочего органа машины в пространстве и, при производстве работ, может определяться погрешность дорожной фрезы, что позволяет вносить своевременные корректировки в задаваемые параметры процесса (глубина зарезания, поперечный уклон).

Согласно законодательству города Санкт-Петербург в области дорожного строительства при выполнении работ по текущему ремонту УДС наличие проекта вертикальной планировки территории не является обязательным [2]. Подрядчику передается плановое положение элементов УДС, используемое для составления ведомости объемов работ. Вертикальную разбивку в таких случаях подрядные организации производят собственными силами. В силу ограниченности времени, выделяемого на выполнение работ, зачастую составление картограммы фрезерования приходится производить непосредственно во время

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

проведения работ, что снижает производительность звена машин – возникают простои на время проведения разбивки и разработки картограммы.

Цель работы – составление алгоритма расчета картограммы фрезерования с учетом ограничений, обоснованных технологическими характеристиками процесса и нормами строительства. Появление автоматизированного алгоритма поможет сократить продолжительность проведения подготовительных работ при частичной разборке покрытия.

Оптимизационные модели, использование которых возможно для составления алгоритма, можно разделить на несколько категорий в зависимости от метода поиска решения. Сравнение методов приведено в Табл. 1.

Таблица 1. Сравнение методов оптимизации

Метод	**Характеристики метода**	
	Преимущества	***Недостатки***
Линейное программирование [3-5]	1. Однозначное определение глобального оптимума	1. Невозможность решения нелинейных задач
Обобщенный приведенный градиент (ОПГ) [6–8]	1. Возможность решения нелинейных задач 2. Высокая эффективность вычислений при сильно выпуклой функции	1. Склонность к определению локального оптимума
Эволюционный метод [9, 10]	1. Возможность решения задач широкого спектра; 2. Высокая сходимость метода	1. Зависимость результата от настроечных параметров, подбираемых опытным путем 2. Высокая загрузка вычислительных мощностей

Выбор программного комплекса для расчетов зависит от используемой модели оптимизации и ее сложности. Сравнительный анализ наиболее распространенных программ представлен в Табл. 2 [11–14].

Таблица 2. Сравнительный анализ программ

Параметр		**Значение параметра для программы**		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	**Mathcad 15**	**Matlab R2014; «Optimization toolbox»**
Максимальное количество структурных элементов модели	неизвестные переменные	200	∞	∞
	прямые ограничения	400	∞	∞
	непрямые ограничения	100	∞	∞

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Параметр		Значение параметра для программы		
		MS Excel 2019; «Поиск решения»	**Mathcad 15**	**Matlab R2014; «Optimization toolbox»**
Используемые алгоритмы реализации моделей	линейные модели	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ;	1. Симплекс-метод	1. Симплекс-метод; 2. Метод ветвей и границ
	нелинейные модели	1. ОПГ; 2. Эволюционный метод	1. ОПГ; 2. Алгоритм Левенберга-Маркуарда; 3. Квази-метод Ньютона	1. ОПГ; 2. Последовательное квадратичное программирование; 3. Метод внутренней точки

Разработка расчетного комплекса производится в программе MS Excel. Данная программа имеет достаточный функционал для решения нелинейных оптимизационных моделей, а также поддерживает установку на смартфон, что повышает доступность расчетного комплекса для инженерно-технических работников, находящихся непосредственно на производственной линии. Расчетный алгоритм должен обеспечивать условия водоотвода и соблюдение требований к проектированию УДС, минимизируя отклонение глубин зарезания рабочего органа в контрольных точках от целевого значения.

ДАННЫЕ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В первую очередь, для формирования системы ограничений, производится сбор данных для проектирования и анализ технологии работ.

Показатели допустимых поперечных и продольных уклонов устанавливаются СП 396.1325800.2018 [14]. Минимальный поперечный уклон – 5 ‰, максимальный – 30 ‰ (в сложных градостроительных условиях и при проведении работ по реконструкции).

Помимо нормативных ограничений присутствуют технологические – движение машины в процессе фрезерования прямолинейное. БЛ должны быть взаимно параллельны, так как поперечный уклон формируется перпендикулярно по отношению к направлению движения машины.

В местах примыкания к существующему покрытия или бортовому камню глубина зарезания должна соответствовать проектной толщине покрытия.

Результат фрезерования в общем случае – плоскость, параллельная плоскости проектируемого покрытия и лежащая ниже на толщину

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

проектного слоя. Задача сводится к проектированию плоскости с соблюдением вводимых ограничений. Результат расчета алгоритма – поверхность в виде набора точек, представленная на Рис. 1, с постоянными (заранее известными) координатами X и Y (плановое положение) и переменной координатой Z (высотой). Координата Z – неизвестная переменная.

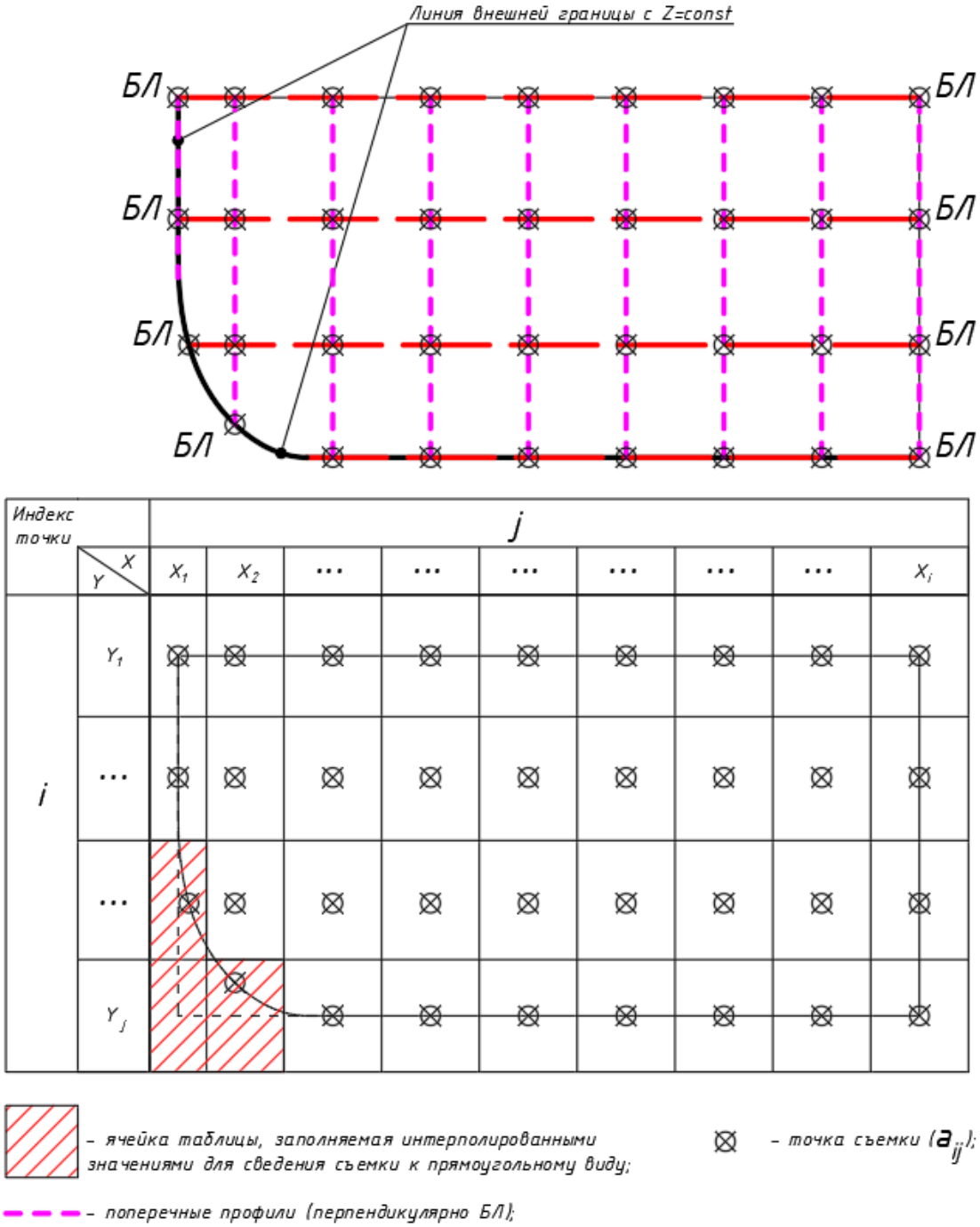


Рис. 1. Плановое изображение поверхности и ее табличная интерпретация

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Исходными данными для алгоритма является съемка существующей поверхности (фактические высотные отметки точек съемки – a_{iJ}; плановое положение точек съемки – X_J и Y_i).

Оценка оптимальности проектной поверхности осуществляется с помощью показателя глубины зарезания рабочего органа машины относительно существующей поверхности. Для точки находится как:

$$h_{iJ} = a_{iJ} - (x_{iJ} - \delta) \quad (1)$$

где x_{iJ} – проектная высотная отметка точки, м;

δ – толщина устраиваемого слоя асфальтобетонного покрытия согласно проекту, см.

Определим условия, соблюдение которых необходимо для выполнения ограничений глубины реза в местах примыкания к бортовому камню:

$$a_{i1} = x_{i1};\ i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

$$a_{iJ} = x_{iJ};\ i = n; J = 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

Для обеспечения соответствия проектных уклонов нормативным требованиям составлены следующие неравенства:

$$\max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} \geq I^{min} \quad (4)$$

где $x_{i-1,J}$; $x_{i+1,J}$; $x_{i,J-1}$; $x_{i,J+1}$ – проектная высотная отметка точек, соседних для точки x_{iJ}, м;

Y_i; Y_{i-1}; Y_{i+1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м;

X_J; X_{J-1}; X_{J+1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

I^{min} – минимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

$$\max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} \leq I^{max} \quad (5)$$

где I^{max} – максимально допустимый уклон в любой точке покрытия, %.

Схема, поясняющая выражения (4) и (5), указана на Рис. 2.

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

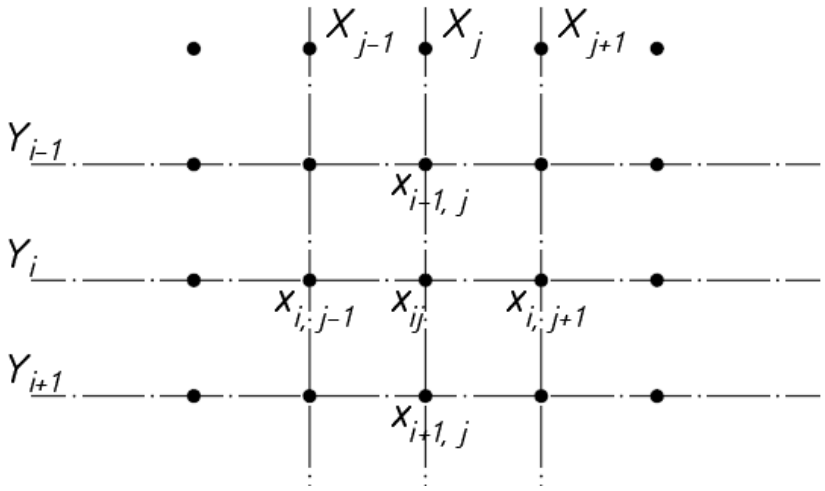


Рис. 2. Схема к определению уклона

После формирования ограничений определяется выражение, описывающее целевую функцию. Так как объект моделирования – площадной, то глубину зарезания стоит рассматривать как средневзвешенную по окрестным для точек площадям (Рис. 3).

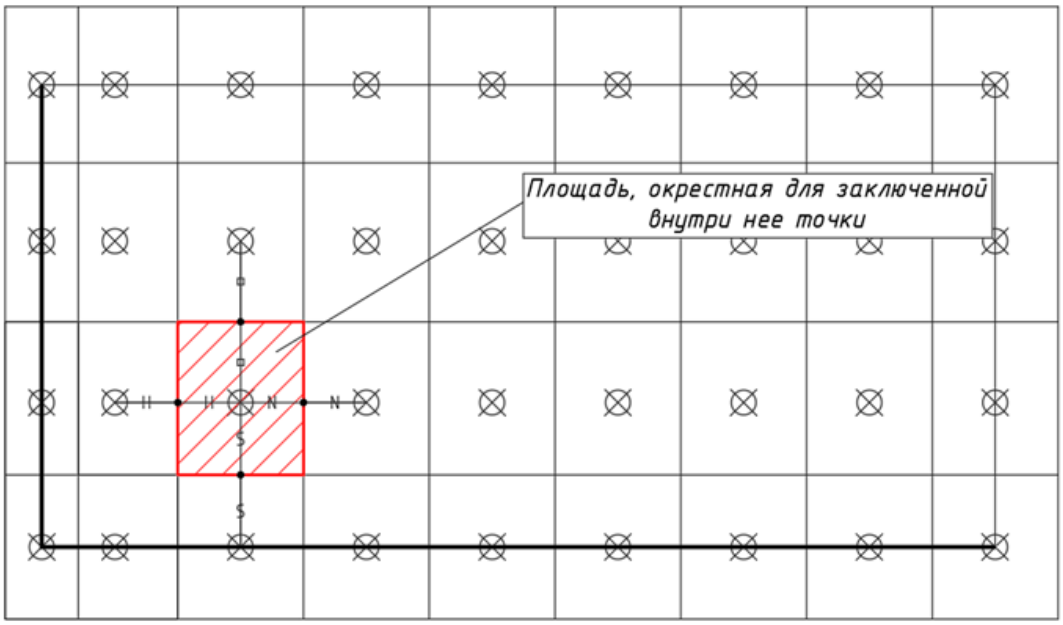


Рис. 3. Схема к определению площади, окрестной для точки

Вес каждой из точек рассчитывается исходя из ее окрестной площади [15]:

$$\sigma_{iJ} = \frac{s_{iJ}}{S_{\text{общ}}} \quad (6)$$

где s_{iJ} – площадь, окрестная для точки съемки a_{iJ}, м^2;

$S_{\text{общ}}$ – площадь всей площадки, м^2.

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

$$s_{iJ} = 0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right) \quad (7)$$

где X_{J+1}; X_{J-1} – координата по оси X для соответствующих поперечных профилей, м;

Y_{i+1}; Y_{i-1} – координата по оси Y для соответствующих БЛ, м.

$$S_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} s_{iJ} \quad (8)$$

Критерий оптимальности отображает отклонение фактической глубины зарезания от предпочтительной:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2 \rightarrow min \quad (9)$$

где λ – предпочтительная глубина зарезания, задаваемая пользователем, см.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В Табл. 3 приводятся элементы математической модели.

Таблица 3. Элементы математической модели

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
1	***Общие исходные данные – характеристики структуры объекта***		
1.1	Количество поперечных профилей	ед.	m
1.2	Количество БЛ	ед.	n
1.3	Индекс поперечных профилей	-	J
1.4	Индекс БЛ	-	i
2	***Исходные данные – характеристики проектируемой поверхности***		
2.1	Фактическая высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	м	a_{iJ}
2.2	Координаты поперечного профиля J, $J = 1, 2, \dots, m$	м	X_J
2.3	Координаты БЛ i, $i = 1, 2, \dots, n$	м	Y_i
2.4	Проектная толщина слоя покрытия	см	δ
2.5	Минимальный нормативный уклон	%	I^{min}
2.6	Максимальный нормативный уклон	%	I^{max}
2.7	Предпочтительная глубина зарезания	см	λ

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

№ п/п	Наименование элемента исходных данных / неизвестной переменной	Ед. изм	Обозначение
3	***Неизвестные переменные***		
3.1	Проектная высотная отметка точки, лежащей на БЛ i в рамках поперечного профиля J, $i = 1, 2, \dots, n; J = 1, 2, \dots, m$	м	x_{iJ}
4	***Расчетные характеристики***		
4.1	Максимальный уклон ребер поверхности, лежащих между точкой a_{iJ} и соседними для нее точками, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	%	$maxI_{iJ}$
4.2	Площадь, окрестная для точки a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	м^2	s_{iJ}
4.3	Общая площадь площадки	м^2	$S_{\text{общ}}$
4.4	Вес точки a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m$	-	σ_{iJ}
5.5	Глубина зарезания в точке a_{iJ}, $i = 1, 2, \dots, n;$ $J = 1, 2, \dots, m$	см	h_{iJ}
5	***Критерий оптимальности***		
5.1	Суммарное отклонение расчетной глубины зарезания от предпочтительной	см^2	$\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2$

На основании Табл. 3 составлена система выражений, являющаяся оптимизационной моделью.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} \sigma_{iJ} \cdot \left(h_{iJ} - \lambda\right)^2 \to min, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (9) \\ h_{iJ} = a_{iJ} - \left(x_{iJ} - \delta\right), i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (1) \\ x_{i1} = a_{i1};\ i = 1, 2, \dots, n-1 & (2) \\ x_{iJ} = a_{iJ};\ i = n; J = 2, 3, \dots, m & (3) \\ maxI_{iJ} \geq I^{min}, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (10) \\ maxI_{iJ} \leq I^{max}, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (11) \\ maxI_{iJ} = max\left\{\frac{x_{iJ} - x_{i-1,J}}{|Y_i - Y_{i-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i+1,J}}{|Y_i - Y_{i+1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J-1}}{|X_J - X_{J-1}|}; \frac{x_{iJ} - x_{i,J+1}}{|X_J - X_{J+1}|}\right\} & (12) \\ i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & \\ x_{iJ} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & (13) \\ \sigma_{iJ} = \frac{0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{J=1}^{m} 0{,}25 \cdot \left(X_{J+1} - X_{J-1}\right) \cdot \left(Y_{i+1} - Y_{i-1}\right)}, & (14) \\ i = 1, 2, \dots, n;\ J = 1, 2, \dots, m & \end{cases}$$

Received: 09.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Критерий оптимальности и расчетные характеристики раскрыты через исходные данные и неизвестные переменные [16].

Сформированная модель нелинейная – целевая функция и ограничения (10) и (11) нелинейные. Переход к линейному виду невозможен. Применение симплекс-метода не даст решения.

Использование метода ОПГ в общем случае чревато попаданием в локальный оптимум. С учетом сложности ограничений (10) и (11) метод необходимо до начала расчетов вносить предварительные высотные отметки в поле вывода результата. Так как технология фрезерования не предполагает сильного отличия формируемой поверхности от фактической, то в качестве предварительных высотных отметок может быть использована съемка фактической поверхности.

Использование эволюционного метода требует ввода дополнительных исходных данных, сильно влияющих на результат вычислений. Подбор этих данных производится опытным путем, что повышает трудоемкость решения.

С учетом всех факторов выбранный метод решения модели – ОПГ.

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В MS EXCEL

Для проверки адекватности модели использована картограмма площадки, расположенной на объекте текущего ремонта УДС по адресу пересечение улиц Литовской и Грибалевой. Нивелирная съемка и прочие исходные данные указаны на Рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	**Поле ввода исходных данных**							
2	Таблица 1 - Исходные данные (результат съемки), м							
3	Индекс точки		1	2	3	4	5	6
4		X / Y	0	5	10	15	20	25
5	1	0	9,76	9,94	9,79	9,86	9,95	10,01
6	2	4	9,77	9,91	9,85	9,8	9,86	9,97
7	3	7	9,76	9,87	9,9	9,88	9,92	9,86
8	4	9,5	9,76	9,77	9,78	9,84	9,87	9,92
9								
10	Таблица 2 - Технологические характеристики процесса							
11	Толщина устраиваемого слоя а/б по проекту, см							4
12	Предпочтительная средняя глубина зарезания, см							2
13	Минимально допустимый уклон для обеспечения водоотвода, %:							0,5
14	Максимально допустимый уклон, %							3
15								
16	**Цветовое обозначение ячеек**							
17	Ввод данных на основании нивелирной съемки							
18	Ввод данных на основании разбивки на БЛ и поперечники							
19	Ввод значений технологических характеристик процесса							
20	Результаты расчета алгоритма							

Рис. 4. Исходные данные

Received: 09.05.2023 **Revised:** 09.06.2023 **Accepted:** 30.06.2023
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена:** 09.06.2023 **Принята:** 30.06.2023

Результат расчета алгоритма приведен на Рис. 5 и 6.

Таблица 3 - Проектные отметки верха покрытия (результат расчетов), м

Индекс точки	X / Y	1	2	3	4	5	6
		0	5	10	15	20	25
1	0	9,760	9,910	9,890	9,888	9,969	10,029
2	4	9,770	9,920	9,870	9,868	9,893	9,991
3	7	9,760	9,845	9,855	9,853	9,945	9,933
4	9,5	9,760	9,770	9,780	9,840	9,870	9,920

Таблица 4 - Глубина зарезания, см

Индекс точки	X / Y	1	2	3	4	5	6
		0	5	10	15	20	25
1	0	4,000	7,000	-6,000	1,250	2,060	2,078
2	4	4,000	3,008	2,000	-2,750	0,750	1,894
3	7	4,000	6,500	8,500	6,750	1,500	-3,250
4	9,5	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

Рис. 5. Проектная поверхность и значения глубин зарезания

9,760	←	3,0	**9,910**	0,4	→	**9,890**	0,05	→	**9,888**	←	1,6	**9,969**	←	1,2	**10,029**
↑			↑			0,5			0,5			1,9			1,0
0,2			0,2			↓			↓			↓			↓
9,770	←	3,0	**9,920**	1,0	→	**9,870**	0,05	→	**9,868**	←	0,5	**9,893**	←	2,0	**9,991**
0,3			2,5			0,5			0,5			↑			2,0
↓			↓			↓			↓			1,8			↓
9,760	←	1,7	**9,845**	←	0,2	**9,855**	0,05	→	**9,853**	←	1,9	**9,945**	0,25	→	**9,933**
0,0			3,0			3,0			0,5			3,0			0,5
0,0			↓			↓			↓			↓			↓
9,760	←	0,2	**9,770**	←	0,2	**9,780**	←	1,2	**9,840**	←	0,6	**9,870**	←	1,0	**9,920**

Рис. 6. Проектная поверхность с обозначением величины уклонов и их направлением

Из Рис. 6 видно, что БЛ, формируемые алгоритмом, не всегда являются плавными. Но, в то же время, сгладить БЛ методами, предложенными в [4–6], не представляется возможным, так как в указанных работах один числовой ряд, а в данной статье обработке должны подвергаться несколько взаимосвязанных рядов. Для подбора оптимального коэффициента сглаживания каждой БЛ в отдельности и их соотношения между собой необходимо затратить большое количество

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

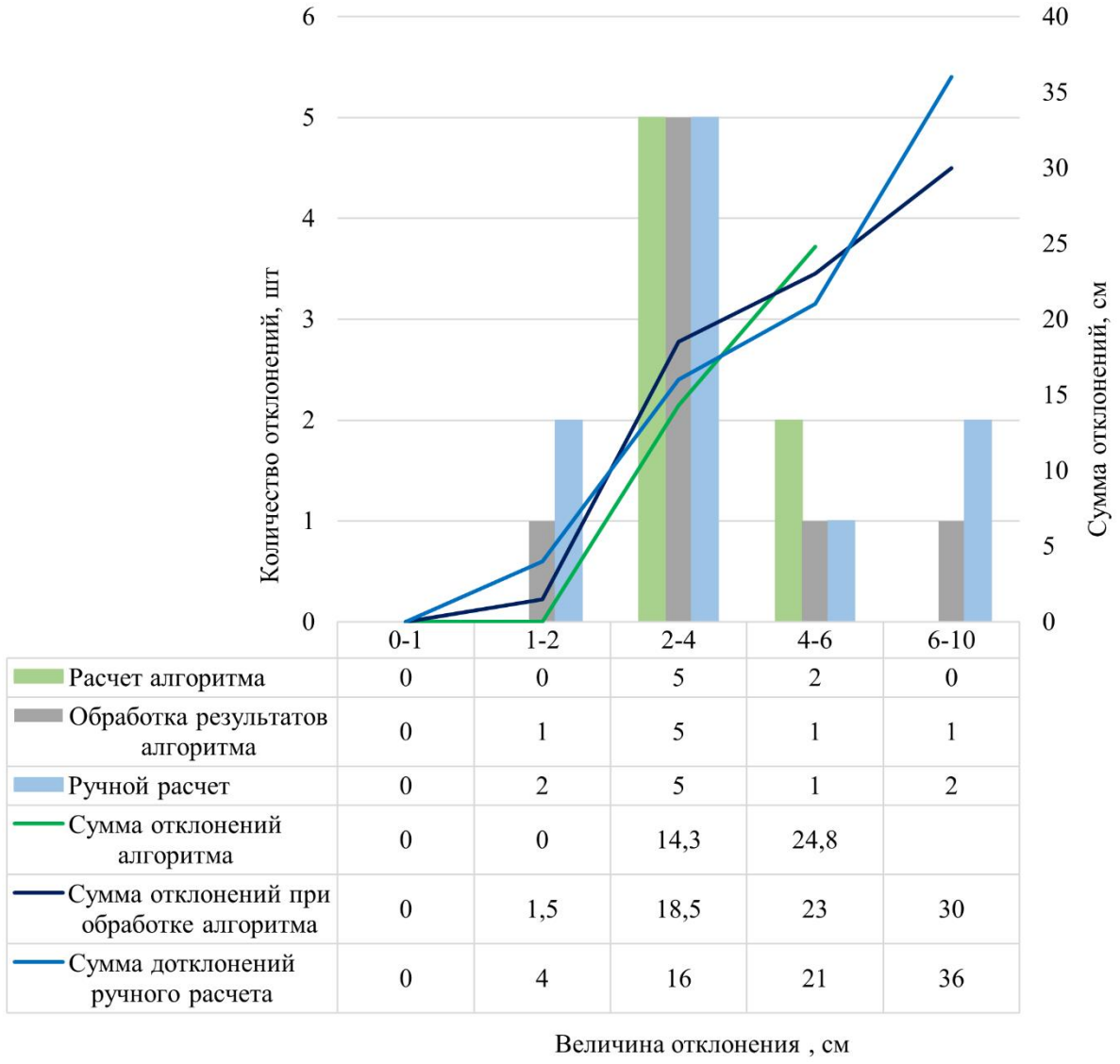
времени. В этой работе сглаживание полученных результатов предлагается проводить вручную после завершения работы алгоритма.

На Рис. 7 представлен график сопоставления результатов, полученных в ходе расчета, обработанных вручную после расчета и полученных полностью ручным способом.

Рис. 7. Графики сопоставления продольных профилей по БЛ №1-№3, полученных различными способами

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

На Рис. 8 представлены графики, отображающие частоту появления отклонений глубин зарезания от диапазона 0–4 см (4 см – толщина устраиваемого покрытия по проекту; выход глубины зарезания из данного диапазона ведет к перерасходу асфальтобетонной смеси).



	0-1	1-2	2-4	4-6	6-10
Расчет алгоритма	0	0	5	2	0
Обработка результатов алгоритма	0	1	5	1	1
Ручной расчет	0	2	5	1	2
Сумма отклонений алгоритма	0	0	14,3	24,8	
Сумма отклонений при обработке алгоритма	0	1,5	18,5	23	30
Сумма дотклонений ручного расчета	0	4	16	21	36

Рис. 8. Частота отклонений глубины реза от диапазона [0–4] см в зависимости от способа составления картограммы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье модель составления картограммы фрезерования работает в полуавтоматическом режиме: первоначальный результат расчетов стоит обрабатывать для получения более гладкой плоскости. Однако даже с учетом этого алгоритм ускоряет рабочий процесс – составление картограммы в полностью ручном режиме заняло 31 минуту, ввод данных в программу с последующей ручной корректировкой

Received: 09.05.2023
Поступил: 09.05.2023
Revised: 09.06.2023
Одобрена: 09.06.2023
Accepted: 30.06.2023
Принята: 30.06.2023

результата занял 12 минут. Объем сокращения рабочего времени в данном случае составил 61,3 %.

Из Рис. 7 видно, что после обработки результатов расчета, полученные продольные профили находятся в промежуточном положении между результатами расчета алгоритма и ручного расчета. Следовательно, результат работы алгоритма стоит воспринимать как наиболее выгодный с точки зрения глубин зарезания вариант картограммы, однако неровный и требующий дальнейшей обработки (Рис. 6, 7). Обработанные результаты расчета кардинальным образом не отличаются от предложенных алгоритмом, а значит, на этап обработки не требуется отводить значительное количество времени. Полностью ручной расчет требует от лица, решающего задачу, самостоятельно определить наиболее предпочтительные способы водоотвода и места расположения переломов профиля (линии лотков и водоразделов).

Из Рис. 8 следует, что при ручном расчете суммарное отклонение глубины зарезания наибольшее – 36 см. Суммарное отклонение при обработке результатов алгоритма составляет 30 см, что близко к среднеарифметическому значению результатов полностью ручного расчета и полностью автоматизированного (30,4 см), и на 16,7 % меньше, чем при ручном расчете. При ручном способе расчета отклонения распределяются наиболее равномерно, при автоматическом способе – наименее, т.к. алгоритм позволяет отклонение от диапазона только в местах, где это необходимо для соблюдения условий водоотвода.

Таким образом, полуавтоматическое построение картограммы с использованием приведенной модели представляет собой компромиссное решение, сочетающее в себе одновременно гладкость поверхности и минимизацию отклонений глубины реза от целевого диапазона и при этом экономящее время, необходимое для проведения подготовительных работ.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Васильев К.А., Бирюков О.Р., Алексеев С.В. Выбор способа устройства поперечного уклона проезжей части при ремонте автомобильной дороги / Материалы всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». 26–30 апреля 2021; СПб. ФГАОУ «СПбПУ», 2021. – С. 297–299. [Vasil'ev KA, Birjukov OR, Alekseev SV. Vybor sposoba ustrojstva poperechnogo uklona proezzhej chasti pri remonte avtomobil'noj dorogi. Materials of the All-Russian Conference “Nedelja nauki ISI”. 2021 Apr 26-30; St. Petersburg. FGAOU SPbPU, 2021. pp. 297-299. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46294849 Ссылка активна на 29.04.2023.

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Закон Санкт-Петербурга №163-34 от 11 апреля 2013 г. «О порядке ремонта и содержания автомобильных дорог в Санкт-Петербурге (с изменениями на 18 марта 2020 года)» [Law of St. Petersburg № 163-34 of 11 April 2013. “O porjadke remonta i soderzhanija avtomobil'nyh dorog v Sankt-Peterburge (s izmenenijami na 18 marta 2020 goda)”. (In Russ.)]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: https://npa.gov.spb.ru/SpbGovSearch/Document/2079.html

3. Лебедева А.К. Моделирование систем методами линейного программирования / Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования». 18–23 апреля 2022 года; Краснодар. Краснодар: ФГБУ "РЭА" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2022. – С. 317–321. [Lebedeva AK. Modelirovanie sistem metodami linejnogo programmirovanija. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists “Prikladnaja matematika: sovremennye problemy matematiki, informatiki i modelirovanija”. 2022 Apr 18–23; Krasnodar. Krasnodar: FGBU "REA" Min`energo Rossii Krasnodarskij TsNTI – filial FGBU "REA" Min`energo Rossii 2022. pp. 317-321. (In Russ.)]. Ссылка активна на 29.04.2023. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49529423

4. Chew EP, Goh CJ, Fwa TF. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1989; 5(23): 315–329. doi: 10.1016/0191-2615(89)90008-8

5. Artun A, Radaev AE, Badenko VL. Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm. *Construction of unique buildings and structures*. 2019;7(82):7-13. doi: 10.18720/CUBS.82.1

6. Shewchuk J. An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain. 1994 Mar [cited 2023 Apr 29]. Available from: https://people.eecs.berkeley.edu/~jrs/papers/cg.pdf

7. Bertsekas D. P. Convex Optimization Theory. Belmont, Athena Scientific Publ., 2009. 444 p. [cited 2023 Apr 29]. Available from: http://web.mit.edu/dimitrib/www/Convex_Theory_Entire_Book.pdf

8. Нестеров Ю.Е. Методы выпуклой оптимизации. Москва: МЦНМО, 2007. [Nesterov JuE. *Metody vypukloj optimizatsii.* Moscow: MTsNMO, 2007. (In Russ)]. Доступно по: https://mipt.ru/dcam/upload/abb/nesterovfinal-arpgzk47dcy.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

9. Зайцев А.А., Курейчик В.В., Полупанов А.А. Обзор эволюционных методов оптимизации на основе роевого интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 7–12. [Zajtsev AA, Kurejchik VV, Polupanov AA. Obzorevoljutsionnyh metodov optimizatsii na osnove roevogo intellekta. *Izvestija JuFU. Engineering Sciences.* 2010;12(113):7-12. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15553703_33238503.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

10. Help and Documentation - MATLAB & Simulink. [Cited 2023 Apr 29]. Available from: https://www.mathworks.com/help/simulink

11. Справка и обучение по Excel. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: https://support.microsoft.com/en-us/excel

12. Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.А., Рыков В.А. Методы оптимизации в примерах в пакете MATHCAD 15, Часть III Многомерная оптимизация. Аналитические методы. СПб: ИТМО, 2018. [Rykov SV, Kudrjavtseva IV, Rykov SA, Rykov VA. *Metody optimizatsii v primerah v pakete MATHCAD 15, Chast'*

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

III Mnogomernaja optimizatsija. Analiticheskie metody. St. Petersburg: ITMO, 2018. (In Russ.)]. Доступно по: https://books.ifmo.ru/file/pdf/2359.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.

13. Хабарова Д.С. Обзор программных комплексов многокритериальной оптимизации // Прикладная информатика. – 2013. – № 2(44). – С. 102–112. [Habarova DS. Obzor programmnyh kompleksov mnogokriterialnoj optimizatsii. *Prikladnaja informatika*. 2013;2(44):102-112. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18946985_85841042.pdf Ссылка активна на: 29.04.2023.
14. Свод правил №396.1325800.2018 от 1 августа 2018 г. «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования (с Изменениями N 1, 2)». [Body of rules №396.1325800.2018 of 1 August 2018. “Ulitsy i dorogi naselennyh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovanija (s Izmenenijami N 1, 2)”. (In Russ.)]. Дата обращения: 29.04.2023. Режим доступа: https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/81f/SP-396.pdf
15. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путевой навигатор. – 2022. – № 50(76). – С. 30–41. [Ermoshin NA, Romanchikov SA, Averianov DA. Imitatsionnoye modelirovaniye riska razrusheniya dorozhnykh konstruktsiy v mezhremontnyy period. *Putevoy navigator*. 2022;50(76):30-41. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 29.04.2023. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48202390_88032815.pdf
16. Вавилов В.Е. Математическая модель гибридных систем магнитной левитации энерговырабатывающего оборудования автономных систем электроснабжения // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 97–108. [Vavilov VE. Matematicheskaya model gibridnyh sistem magnitnoj levitacii energovyrabatyvayushchego oborudovaniya avtonomnyh sistem elektrosnabzheniya. *Transportation Systems and Technology*. 2016;2(3):97-108. (In Russ.)]. doi**:** 10.17816/transsyst20162397-108

Сведения об авторах:
Федосеев Никита Александрович, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Свальбова Вера Алексеевна, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN:7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN:6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Information about the authors:
Fedoseev A. Nikita, master’s degree student;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Svalbova A. Vera, master's degree student;
eLibrary SPIN:7383-9132; ORCID: 0000-0002-3726-9359;
E-mail: svalbova.va@edu.spbstu.ru

Alekseev V. Sergey, candidate of military sciences, associate professor,
eLibrary SPIN:6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Цитировать:
Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

To cite this article:
Fedoseev NA, Svalbova VA, Alekseev SV. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):66-82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

Received: 09.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 09.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 624.21
DOI 10.17816/transsyst20239283-96

© А.А. Махонько[1], А.В. Мальков[1], А.А. Белый[2], А.А. Антонюк[3]
[1]ООО «ОСА-Север»
[2]Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева
[3]Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВАНТОВОГО МОСТА ЧЕРЕЗ ПЕТРОВСКИЙ КАНАЛ В СТВОРЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «ЗАПАДНЫЙ СКОРОСТНОЙ ДИАМЕТР» В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Цель: Анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» (ЗСД) в городе Санкт-Петербурге.

Материалы и методы: Для получения результатов используются статистические данные с баз данных действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения теоретических методов научного познания: аналитический метод, теория математической статистики, индукция.

Результаты: Представлен анализ действующей системы мониторинга инженерных конструкций с описанием одной из основных проблем – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом. Предложены пути решения сформированной проблемы, определена перспектива дальнейших исследований в части несовершенства систем мониторинга на внеклассных сооружениях.

Заключение: Полученные результаты исследования можно использовать при проектировании и устройстве систем мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах, а также при модернизации и оптимизации действующих систем мониторинга для улучшения качества оценки технического состояния конструкций.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений; управление техническим состояние; объект транспортной инфраструктуры; вантовый мост; напряженно-деформированное состояние.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.A. Makhonko[1], A.V. Malkov[1], A.A. Belyi[2], A.A. Antonyuk[3]
[1]Highway Operator Nord, LLC
[2]Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov
[3]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

EXPERIENCE OF OPERATION MONITORING SYSTEM OF THE CAT-BONE BRIDGE THROUGH THE PETROVSKAYA CHANNEL IN THE ALIGNMENT OF THE WESTERN SPEED DIAMETER HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Aim: Analysis of the current monitoring system of the engineering structures of a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg.

Methods and Materials: Statistical data from the databases of the existing system of monitoring engineering structures is used to obtain the results. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying the theoretical methods of scientific knowledge: the analytical method, the mathematical statistics theory, induction.

Results: Analysis of the current monitoring system of engineering structures is presented with a description of one of the main problems – the impossibility of synchronizing readings from all sensors during considered period of time, which leads to the inability to correctly assess the stress-strain state of the bridge structure as a whole. Discovered problem solutions are proposed, further research prospect is determined in part of the imperfection of monitoring systems for long-span facilities.

Conclusion: The obtained study results can be used in designing and installation of monitoring systems of the engineering structures for cable-stayed bridges, as well as for modernization and optimization of existing monitoring systems to improve the quality of assessing technical condition of structures assessment.

Key words: structural artificial monitoring; technical condition management; transport infrastructure object; cable-stayed bridge; stressed-deformed condition.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях использование систем мониторинга инженерных конструкций (СМИК) является важным компонентом жизненного цикла внеклассных мостовых сооружений.

Применение СМИК является обязательным для обеспечения требуемого уровня безопасности в рамках действующей нормативной базы, в том числе для снижения риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде [1–3].

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Система мониторинга инженерных конструкций представляет собой технологию информационного обеспечения принятия решений по управлению параметрами состояния мостового сооружения на всех стадиях жизненного цикла, реализуемых посредством систематического или периодического слежения (наблюдения) за техническим состоянием конструкций [4–6].

К основным задачам систем мониторинга необходимо отнести:

1. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и всего сооружения с учетом имеющихся дефектов и повреждений [7, 8];
2. Анализ и оценка степени влияния внешних воздействий на несущую способность в рассматриваемый момент времени и на прогнозируемый период;
3. Прогнозирование долговечности сооружения с учетом внешних воздействий и происходящих процессах деградации;
4. Разработка стратегий по восстановлению или улучшению потребительских свойств на действующих или проектируемых сооружениях [9, 10].

При использовании действующей системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в Санкт-Петербурге авторами были выделены несколько проблем, влияющие на качество оценки технического состояния мостового сооружения.

В данной статье авторами будет рассмотрена одна из основных проблем в действующей системе мониторинга – невозможность синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени, что приводит к невозможности корректной оценки напряженно-деформированного состояния мостового сооружения в целом.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Согласно ГОСТ Р 59943-2021 в качестве объектов мониторинга необходимо рассматривать мостовые сооружения, имеющие длину одного из пролетов более 100 м или высотой опор более 15 м. В связи с этим устройство СМИК рассматриваемого моста является обязательным условием при эксплуатации сооружения [11, 12].

При мониторинге конструкций вантового моста предусматривается определение необходимых параметров для анализа напряженно-деформированного состояния различных элементов сооружения. Мониторингу подлежат элементы моста, подверженные наибольшим нагрузкам и изменениям состояния в процессе эксплуатации: опоры, пилоны, вантовая система, пролетное строение [13].

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Основными параметрами, которые определяются в процессе мониторинга являются: абсолютные и относительные смещения конструкций; динамические показатели, влияющие на износ конструкций; натяжение вантовой системы; напряженно-деформированное состояние пролетного строения [14, 15].

На Рис. 1 представлена схема расположения датчиков СМИК на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

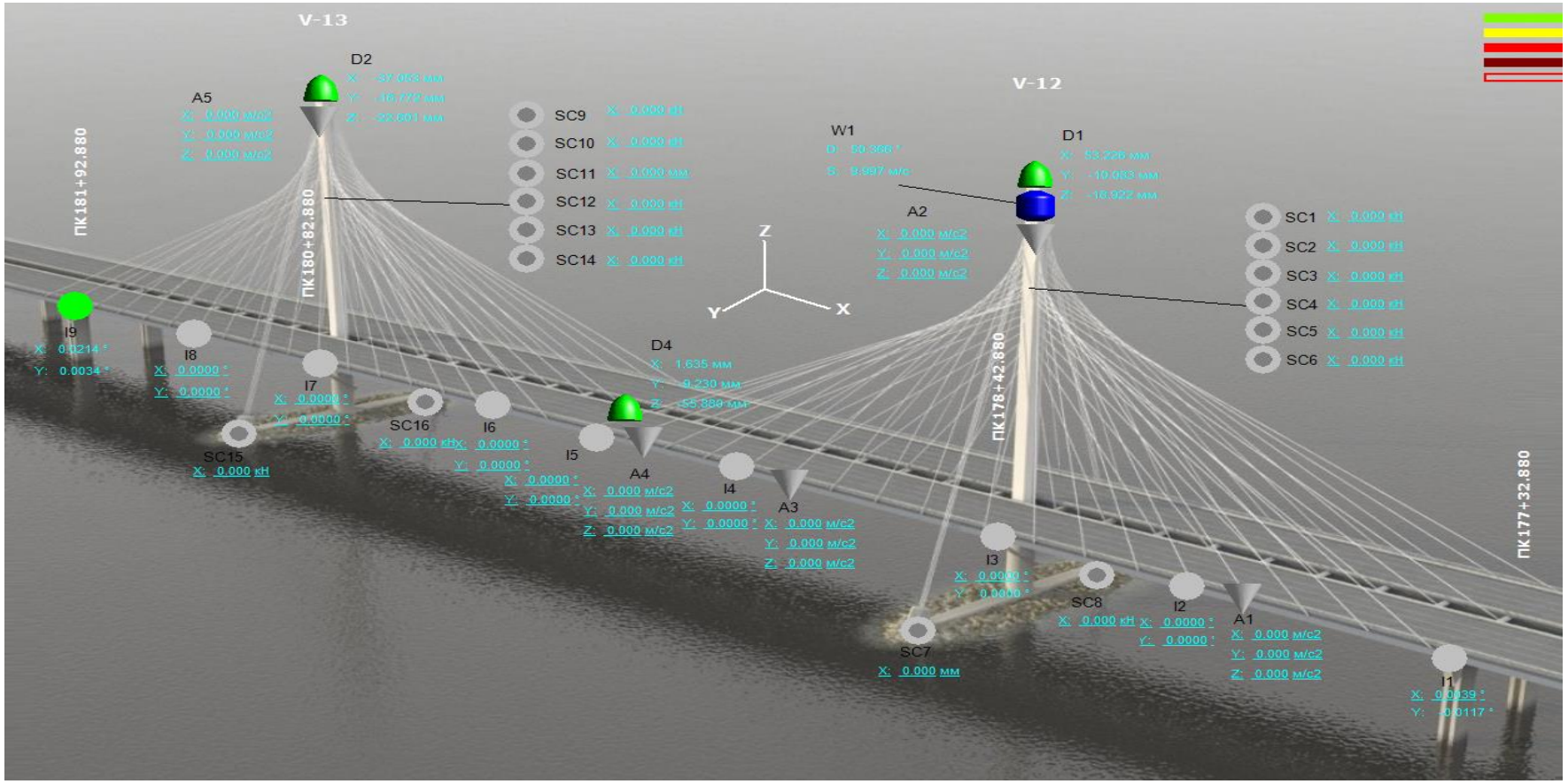


Рис. 1. Схема расположения датчиков системы мониторинга инженерных конструкций

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Установленную систему мониторинга инженерных конструкций можно разделить на подсистемы, которые представлены на Рис. 2.

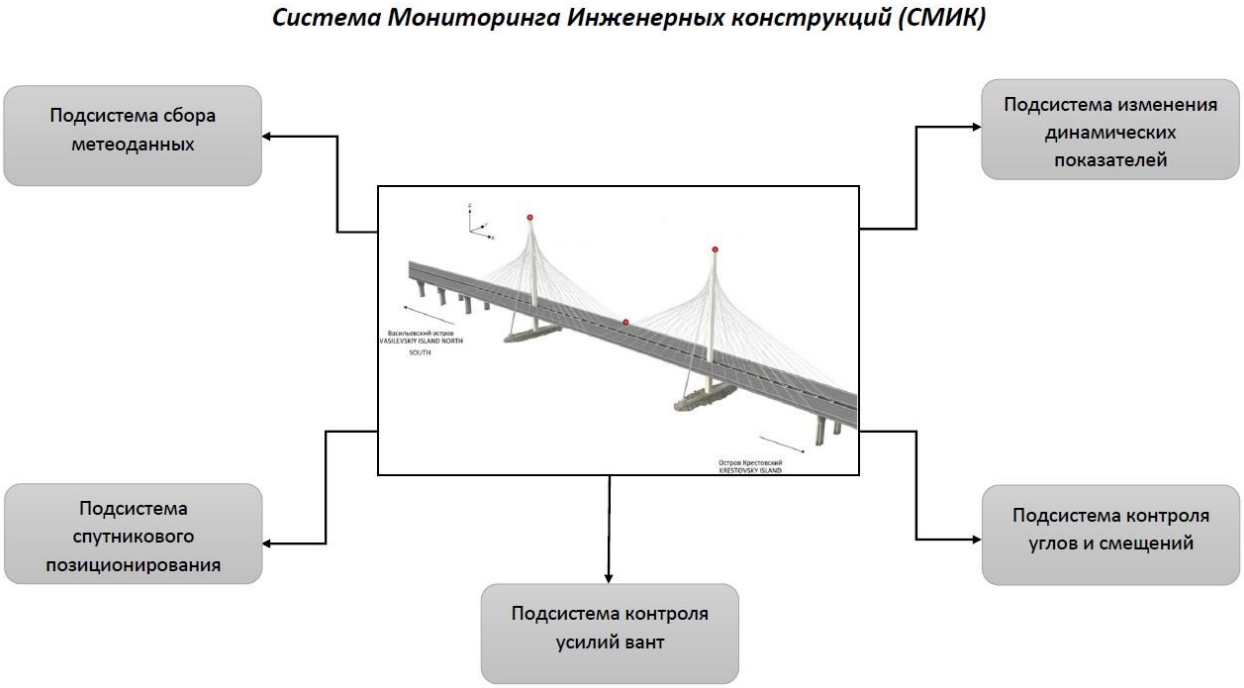


Рис. 2. Схема системы мониторинга инженерных конструкций

В каждой подсистеме находится элемент мостового сооружения, на который устанавливается датчик или группа датчиков. В Табл. 1 представлены зоны контроля и количество установленных датчиков, распределенных по подсистемам СМИК.

Таблица 1. Зоны контроля, подсистемы и количество датчиков

№ п/п	Наименование подсистемы СМИК	Элементы моста, подлежащие мониторингу	Датчики, установленные на элементы моста
1.	Подсистема контроля усилия вант	Вантовая система	Датчик усилия вант (16 шт)
2.	Подсистема изменения динамических показателей	Пилоны; Пролетные строения	Акселерометр (5 шт)
3.	Подсистема контроля углов и смещений	Промежуточные опоры; пролетные строения	Инклинометр (9 шт)
4.	Подсистема спутникового позиционирования	Пилоны; пролетное строение	GPS-станция (3 шт)
5.	Подсистема сбора метеоданных	Пилон	Анеморумбометр (1 шт)

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Далее приведем принцип работы каждой подсистемы с описанием датчиков, входящих в нее.

В подсистеме контроля усилия вант используются датчики усилия, которые установлены на самые нагруженные ванты. Датчики измеряют деформацию в стренде, после чего происходит перерасчет в усилия натяжения. Диапазон измерений составляет от 0 до 240 кН с частотой сбора данных равной 1 Гц. Измерения производятся продолжительностью в 30 минут, после чего определяется среднее значение на данном временном интервале с последующим построением графика изменения усилий в каждой ванте.

На Рис. 3 представлен график изменения усилия нескольких стрендов вант за сутки.

Подсистема изменения динамических показателей выдает динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений колебаний при помощи акселерометров. Акселерометры расположены в точках, наиболее податливых к динамическим воздействиям: верхняя точка пилонов, середина и четверть пролетных строений. Датчик измеряет в двух направлениях (X и Y) с регулируемой частотой дискретизации от 0 до 160 Гц при диапазоне изменений +/-3g. Измерения производятся продолжительностью 30 минут, после чего определяется максимальное значение, которое отображается на графике.

При возникновении ситуации, когда датчик фиксирует значения, превышающие предельные, запись показаний производится с частотой 50 Гц с временным интервалом в 10 минут.

На Рис. 4 показан график изменения ускорений колебаний пилона при значениях, превышающих предельные.

В подсистеме контроля углов и смещений используются одноосевые гравитационно-ориентированные инклинометры, расположенные на промежуточных опорах и пролетных строениях, в местах наиболее подверженных деформации кручения: середина и четверть пролета. Инклинометры смонтированы на уровне проезжей части и измеряют угол поворота в направлении перпендикулярном оси моста. Диапазон измерений +/-5° с частотой сбора данных 1 Гц. Измерения производится в 30-ти минутный интервал времени с последующим получением среднего значения, которые отображается на графике.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

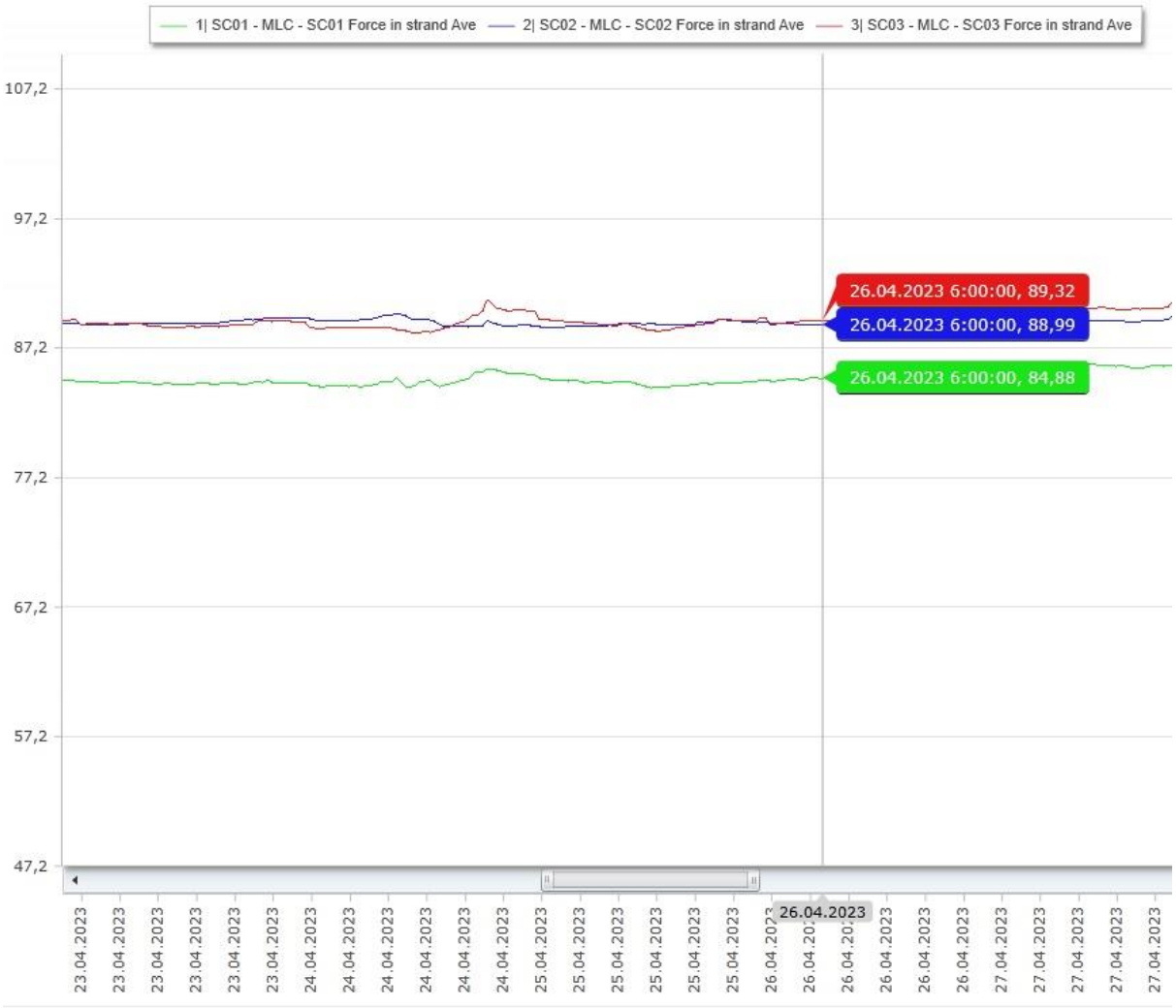


Рис. 3. График изменения усилий в стендах вант

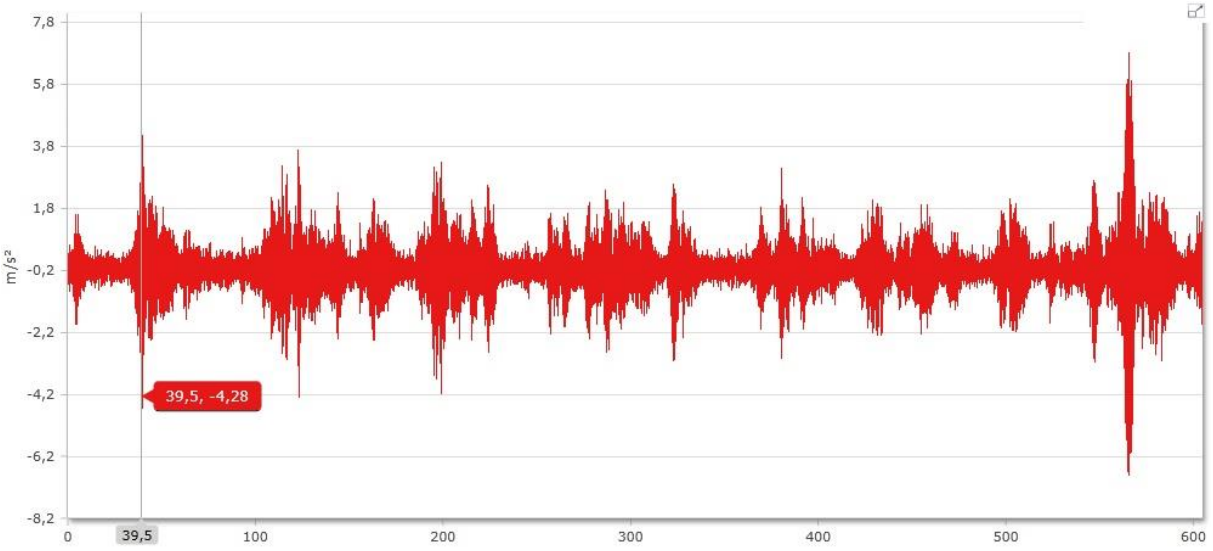


Рис. 4. График изменения ускорений колебаний на пилоне
при превышении предельных значений

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

На Рис. 5 показан график изменения углов поворота в середине и четвертях пролетного строения.

Для работы подсистемы спутникового позиционирования используются спутниковые приемники, принимающие радиосигналы от спутниковых навигационных систем ГЛОНАС и GPS. Данные спутниковые приемники используются для наблюдения за смещением критических точек, которыми являются верхние точки пилонов и середина пролетного строения. Точность зависит от различных факторов, таких как количество отслеживаемых спутников, геометрия созвездия, время наблюдения, точность эфемерид, ионосферные возмущений. Частота позиционирования составляет 1 Гц с количеством каналов равным 120. Измерения осуществляются по трем координатам (X, Y, Z) в 30-ти минутном интервале с последующим определением среднего значения по каждому из направлений.

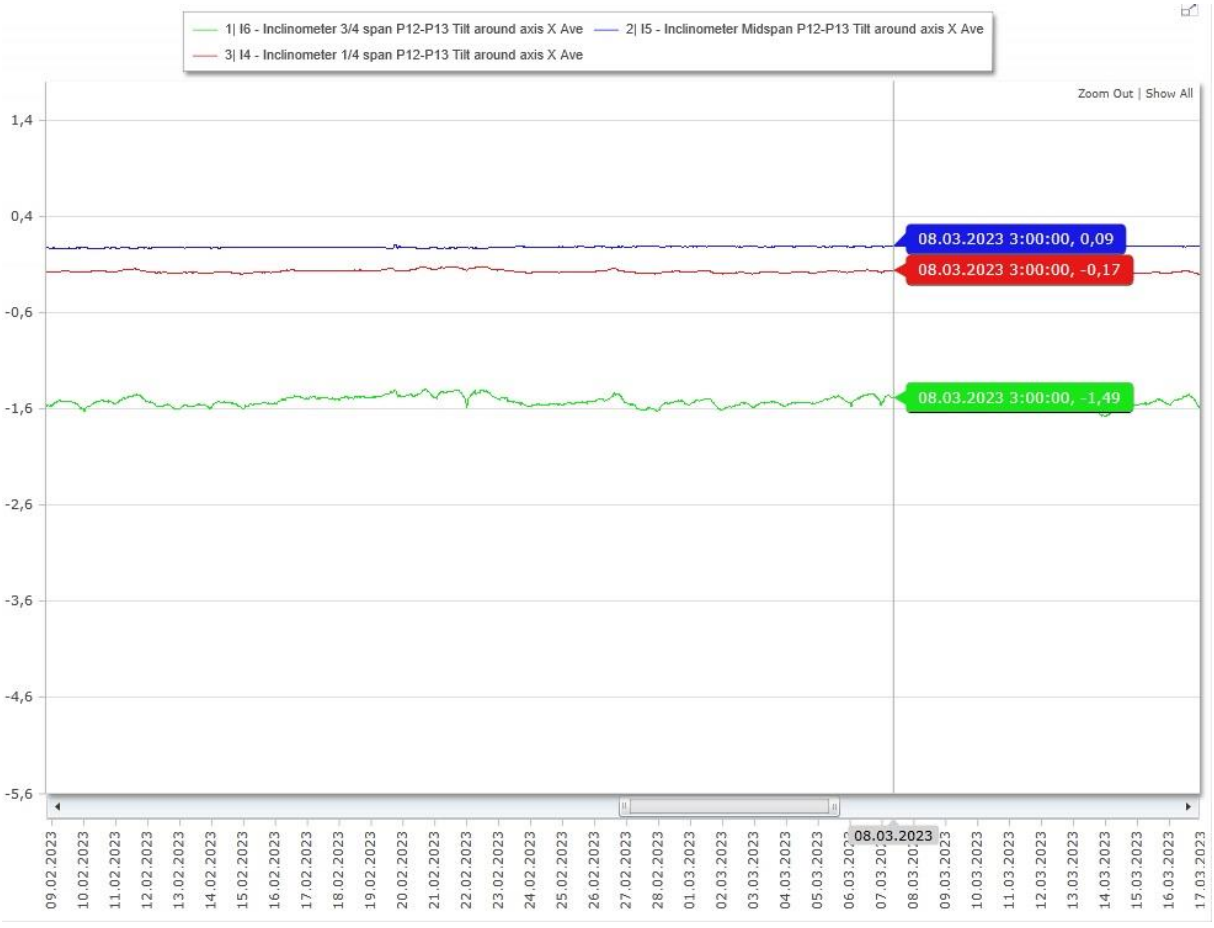


Рис. 5. График изменения углов поворота пролетного строения

На Рис. 6 представлен график с GPS-станции, установленной на пилоне по трем направлениям измерения.

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

Для работы подсистемы сбора метеоданных используется анеморумбометр, который позволяет измерить скорость и направление ветра. Диапазон измерения скорости составляет от 0 до 60 м/с. Устанавливается прибор на верхней точке пилона. Измерения осуществляются в аналогичном временном интервале с частотой сбора данных 1 Гц. Анеморумбометр позволяет получать максимальные, минимальные и средние значения.

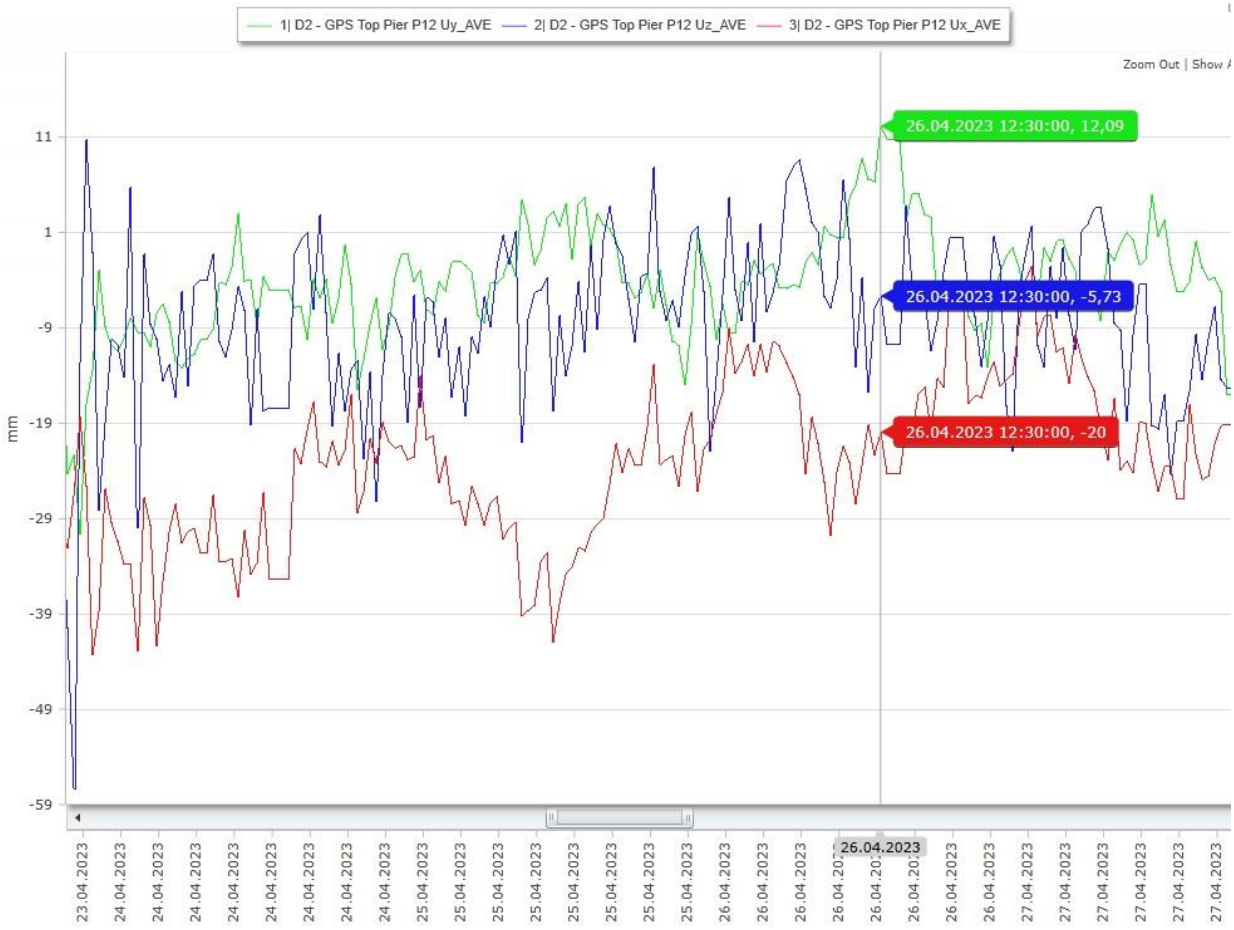


Рис. 6. График изменения смещений верхней точки пилона по трем направлениям

На Рис. 7 показан график изменения средней скорости и среднего направления ветра.

В Табл. 2 приведена сводная ведомость по датчикам, в которой основным параметром следует рассмотреть частоту выходных данных, полученную после анализа СМИК.

Received: 15.05.2023 Revised: 09.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступила: 15.05.2023 Одобрена: 09.06.2023 Принята: 30.06.2023

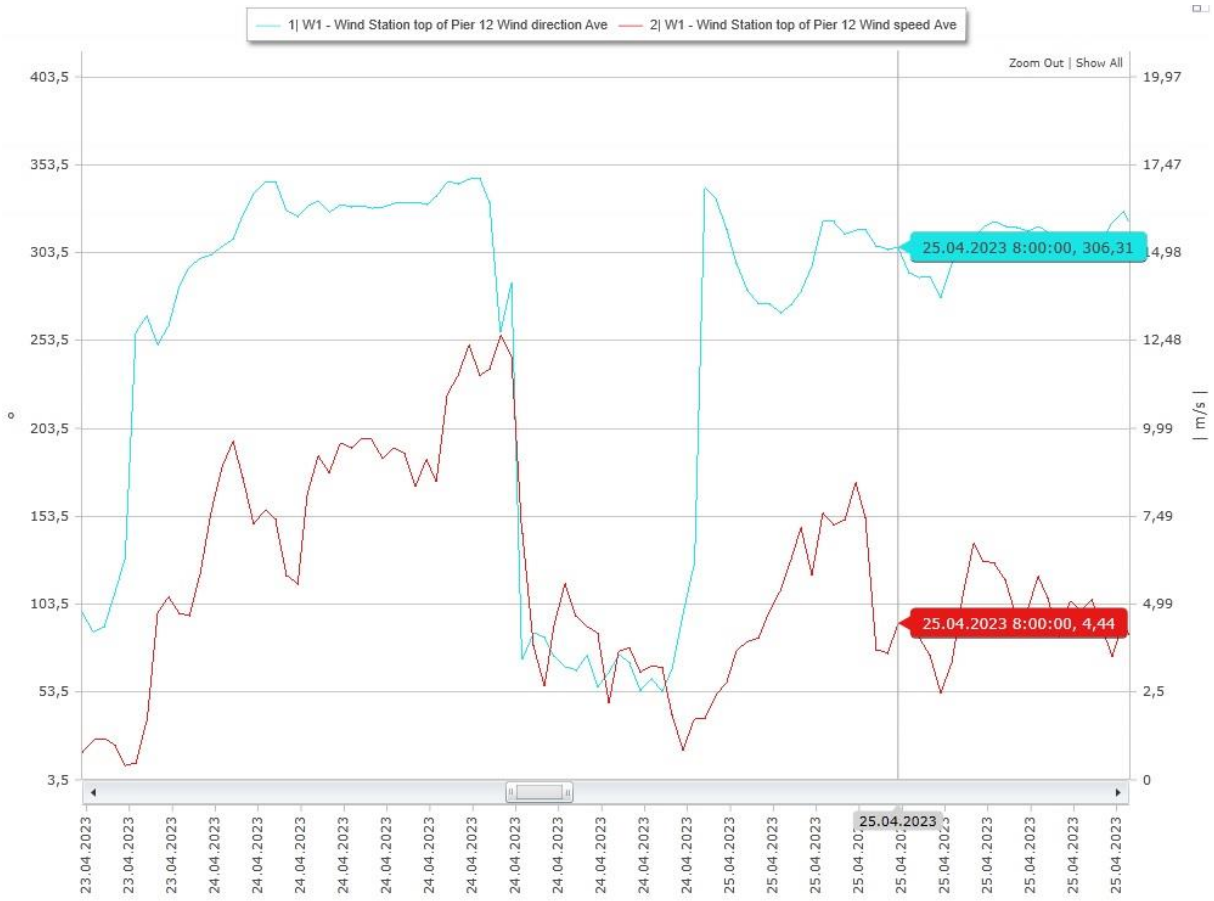


Рис. 7. График изменения средней скорости ветра и среднего направления ветра

Таблица 2. Характеристики датчиков

№ п/п	Наименование датчика	Единицы измерения датчиков	Частота выходных данных, Гц	Временной интервал выходных данных, мин
1.	Датчик усилия вант	кН	0,0005	30
2.	Акселерометр	м/с^2	0,0005/50	30/10
3.	Инклинометр	°	0,0005	30
4.	GPS-станция	мм	0,0005	30
5.	Анеморумбометр	м/с, °	0,0005	30

Из Табл. 2. видно, что частота выходных данных акселерометра имеет значительное превышение в 50 Гц в момент фиксирования значений, превышающих предельные.

В момент фиксирования значений акселерометром, превышающих предельные, другие датчики продолжают выдавать усредненные значения с низкой частотой в 0,0005 Гц, что приводит к невозможности синхронизации показаний со всех датчиков в рассматриваемый период времени.

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Также из анализа результирующих графиков измерений, представленных на Рис. 3–7, учитывая саму цель устройства СМИК, можно констатировать, что каждый измеряемый параметр и временные диапазоны его записи отличны друг от друга, что не позволяет корректно определить причины возникновения нештатных ситуаций, произвести оценку рисков и своевременно принять соответствующие решения в режиме реального времени для недопущения возникновения аварийных ситуаций.

Исходя из выше сказанного следует, что при существующей системе мониторинга возможно производить анализ только отдельных усредненных параметров напряженно-деформированного состояния сооружения, что не позволяет давать корректную оценку об общем техническом состоянии всего мостового сооружения.

ВЫВОДЫ

Авторами статьи проанализирована работа действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги ЗСД в городе Санкт-Петербурге.

Для решения найденной проблемы предлагается:

1. Внести в нормативную документацию рекомендации про необходимость учета синхронизации датчиков в определенный период времени при достижении предельных значений на одном из датчиков системы мониторинга на момент составления проекта СМИК;

2. Произвести оптимизацию системы, при которой получится синхронизировать работу датчиков СМИК в момент фиксации одним из датчиков значений, превышающих предельные, путем единовременной записи соответствующих значений с каждого датчика с максимально возможной частотой.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. ГОСТ Р 59943-2021. Дороги общего пользования. Системы мониторинга мостовых сооружений. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 19 с. [State Standard 59943-2021. Automobile roads of general use. Systems of monitoring bridges. Design rules. Moscow: FGBU “RST”; 2022. 19 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://docs.cntd.ru/document/1200182099

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 120 с. [Vasil'ev AI. Monitoring tehnicheskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij: uchebnoe posobie. Moscow: MADI; 2021. 120 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf

3. Карапетов Э.С., Белый А.А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век». – 2008. – № 4. – С. 80–83. [Karapetov JeS, Belyj AA. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy. *Vestnik "Zodchij. 21 vek"*. 2008;4;80-83. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по ссылке: https://elibrary.ru/download/elibrary_13051187_35424783.pdf

4. Васильев А.И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы // Дорожная держава. – 2008. – № 11. – С. 80–82. [Vasil'ev AI. Monitoring mostovyh sooruzhenij. Zadachi, vozmozhnosti, problem. *Dorozhnaja derzhava*. 2008;(11):80-82. (In Russ.)].

5. Иванов Ю.С., Снежков И.И., Чаплин И.В., Яшнов А.Н. Автоматизация процесса определения усилия в вантовых элементах мостов по частотам собственных колебаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 18–25. [Ivanov YS, Snezhkov II, Shaplin IV, Yashnov AN. Automation Process of Determining the Force in the Cable Elements of Bridges Over Own Frequencies of Vibrations. *The Siberian Transport University Bulletin.* 2017;4;18-25. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessa-opredeleniya-usiliya-v-vantovyh-elementah-mostov-po-chastotam-sobstvennyh-kolebaniy/viewer

6. Яшнов А.Н., Баранов Т.М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 – С. 199–209. [Yashnov AN, Baranov TM. Monitoring of Dynamic Behavior of Bridge Across the Angara in Irkutsk. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building.* 2017;(1):199-209. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285

7. Belyi A, Osadchy G, Dolinskiy K. Practical Recommendations for Controlling of Angular Displacements of High-Rise and Large Span Elements of Civil Structures. In: Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018); 2018 Sept 14–17; Kazan, Russia; 2018. pp. 176-183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743

8. Брынь М.Я., Никитчин А.А., Толстов Е.Г. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29) – С. 58–60. [Bryn MYa, Nikitchin AA, Tolstov EG. Geodesic monitoring of railway transport infrastructure objects. *Transport Rossijskoj Federacii.* 2010;4(29):58-60. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://cyberleninka.ru/article/n/geodezicheskiy-monitoring-obektov-infrastruktury-zheleznodorozhnogo-transporta-sputnikovymi-metodami/viewer

9. Брынь М.Я., Толстов Е.Г., Никитчин А.А., и др. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 2(19) – С. 120–128. [Bryn MYa, Tolstov EG, Nikitchin AA, et al. Geodetic Monitoring of Cable-Stayed Bridge Deformation on the Basis of GNSS Technologies. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2009;2(19):120-128. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/02_2009.pdf

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

10. Белый А.А., Ященко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. – 2020. – № 45(71) – С. 38–45. [Belyi AA, Belov AA, Jashhenko AI, Antonyuk AA. Integralny monitoring mosta Aleksandra Nevskogo. *Putevoi navigator*. 2020;45(71):38-45. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://www.dropbox.com/s/m109hciiixjfx8g/pn-45-2020.pdf?dl=0

11. Гарамов О.В. Длительный приборный мониторинг автодорожных мостов. Проблемы и перспективы // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 27–31. [Garamov OV. Dlitel'nyi pribornyi monitoring avtodorozhnykh mostov. Problemy i perspektivy. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2004;1:27-31 (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/01_2004.pdf

12. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 34–38. [Syrkov AV. Puti razvitija avtomatizirovannyh sistem jekspluatacii i soderzhanija avtodorozhnyh iskusstvennyh sooruzhenij. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2014;2:34-38. (In Russ.)].

13. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (монография). СПб: ПГУПС, 2016. [Efanov DV. *Funkcionalniy kontroli monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki* (monograph). St. Petersburg: PGUPS; 2016. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: https://istina.msu.ru/publications/book/182610023/

14. Сырков А.В., Крутиков О.В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 9. – С. 45–50. [Syrkov AV, Krutikov OV. Optimizacija zhiznennogo cikla mosta na ostrov Russkij vo Vladivostoke sredstvami analiza riskov i monitoring. *Avtomatizacija v promyshlennosti*. 2012;9:45-50. (In Russ.)].

15. Белый А.А., Белов А.А., Осадчик Г.В., Долинский К.Ю. Автоматизация процесса управления техническим состоянием искусственных сооружений Санкт-Петербурга за счет применения средств инструментального мониторинга // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 380–406. [Automation of technical condition management process of St. Petersburg artificial constructions with the usage of structural health monitoring tools. *Automation on Transport*. 2018;4(3):380-406. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.05.2023. Доступно по: http://atjournal.ru/ru/Home/Download?path=articles%2F2018_Vol.4_No.3_5_beliy.pdf

Сведения об авторах:
Махонько Андрей Андреевич, Инженер отдела дорожного надзора;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Мальков Алексей Васильевич, начальник дорожно-эксплуатационной службы;
eLibrary SPIN:0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;
E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru
Белый Андрей Анатольевич; к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;
E-mail: andbeliy@mail.ru
Антонюк Анатолий Анатольевич, инженер-исследователь;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Information about the authors:
Andrey A. Makhonko, quality control engineer;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Aleksey V. Malkov, head of the road maintenance service;
eLibrary SPIN:0000-0000; ORCID: 0009-0002-4006-2006;
E-mail: aleksey.malkov@nch-spb.ru
Andrey A. Belyi; Candidate of Technical Sciences, Assistant professor;
eLibrary SPIN: 1729-5977; ORCID: 0000-0002-2825-1368;
E-mail: andbeliy@mail.ru
Anatoly A. Antonyuk, engineer;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Цитировать:
Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 83–96. doi: 10.17816/transsyst20239283-96

To cite this article:
Makhonko AA, Malkov AV, Belyi AA, Antonyuk AA. Experience in operating the monitoring system for a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(2):83-96. doi: 10.17816/transsyst20239283-96

Received: 15.05.2023 **Revised: 09.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступила: 15.05.2023 **Одобрена: 09.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 33:656.2
DOI 10.17816/transsyst20239297-109

© Н.А. Журавлева, В.А. Печкуров
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РЫНКА ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН В РОССИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КОМПАНИЙ ОПЕРАТОРОВ

Обоснование: Нефть и нефтепродукты до сих пор являются основными статьями российского бюджета. И на рынке железнодорожных перевозок этот сегмент грузов является доминирующим. В ближайшие годы его исследование не потеряет своей актуальности. Постоянно возникающий дефицит вагонов – нефтебензиновых цистерн, ограничивает продажи сырья и продуктов его переработки, ведет к росту стоимости перевозки.

Цель: количественная оценка дефицита вагонов-цистерн для перевозки нефти и нефтепродуктов и разработка оптимальной операционной модели деятельности компании оператора.

Методы: данными для исследования являются статистические выборки показателей рынка перевозок нефти и нефтепродуктов за период с 2020 года по настоящее время, показатели эффективности использования подвижного состава компаний операторов. Исследование построено на методах статистического анализа рынка перевозок нефти и нефтепродуктов, факторного анализа зависимостей объемов грузов, предъявляемых к перевозке, объемов перевозок и состояния вагонного парка компаний операторов.

Результаты: проанализирован структурированный анализ рынка парка вагонов – цистерн в РФ, разработана операционная модель компании оператора с полным комплексом логистических решений по перевозке нефти и нефтепродуктов, реализуемая на основе эффективного использования парка подвижного состава.

Заключение: даны рекомендации по оптимизации операционных затрат на содержание подвижного состава компаний-операторов с учетом поддержания его в надлежащем технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасность движения и рост показателей эффективности перевозки железнодорожным транспортом.

Ключевые слова: рынок перевозки нефти и нефтепродуктов, вагоны-нефтебензиновые цистерны, операционная модель оператора.

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva, V.A. Pechkurov
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF THE TANK CAR MARKET IN RUSSIA AND OPTIMIZATION OF OPERATING MODELS OF OPERATOR COMPANIES

Background: Oil and petroleum products are still the main items of the Russian budget. This segment of cargoes is dominating in the railway transportation market. In the coming years, the study of this segment will not lose its relevance. Constantly arising shortage of wagons - petroleum tank cars, restricts sales of raw materials and products of their processing, leads to growth of transportation costs.

Aim: The major goal is to quantify the shortage of tank cars for oil and petroleum products transportation and to develop an optimal operating model for the operator's company.

Methods: The research data are statistical samples of oil and petroleum products transportation market indicators for the period from 2020 to the present, the indicators of efficiency of the rolling stock use by the operator companies. The research is built on the methods of statistical analysis of the market of oil and petroleum products transportation, factor analysis of dependences of the cargo volumes presented for transportation, the volume of transportation and the condition of the car fleet of operator companies.

Results: The structured analysis of the tank car market in the Russian Federation is analyzed, and the operating model of the operator company with a full complex of logistic solutions for oil and petroleum products transportation, realized on the basis of the efficient use of the rolling stock fleet, is developed.

Conclusion: Recommendations on optimizing operating costs for the maintenance of the rolling stock of operating companies, taking into account its maintenance in proper technical condition, ensuring traffic safety and increasing the efficiency of transportation by rail are given.

Key words: oil and petroleum products transportation market, petroleum tank cars, operator's operating model.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы рынка железнодорожных грузовых перевозок отражают в полной мере процессы нестабильности товарных рынков. Их исследования всегда в центре внимания научного экономического сообщества на транспорте [1]. Рынок услуг по перевозке нефти и нефтепродуктов РФ представлен транспортно-логистическими компаниями – операторами вагонов (нефтебензиновые цистерны). В первом квартале 2023 года 193 собственника цистерн владели 99 % парка России. В целом, из 600

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

компаний, операторов железнодорожного подвижного состава (оперирование всеми видами вагонов: цистерны, цементовозы, хопперы, зерновозы, фитинговые платформы, автомобилевозы и пр.) только 30 перевозят 80,8 % грузов, на их долю приходится 77,2 % парка в собственности, с учетом финансового лизинга и в управлении. Рынок достаточно высоко монополизирован, что дает нам основание при исследовании нескольких операторских компаний, делать обобщение в отношении данного сегмента рынка перевозок РФ.

Основными операторами на рынке перевозки нефтепродуктов, являются ООО «Трансойл» (31,41 тыс. единиц), АО «Первая грузовая компания» (30,3 тыс. единиц), ОАО «СГ-транс» (19,75 тыс. единиц), ООО «Газпромтранс» (16,66 тыс. единиц), ЗАО «СИБУР-Транс» (16,07 тыс. единиц), ЗАО «НефтеТрансСервис» (15,89 тыс. единиц) [2]. Несмотря на сокращение погрузки нефти и нефтепродуктов – на 0,7 % до 216 млн. т., дефицит вагонов сохраняется. Кроме этого, деятельность всех операторов ограничивается загруженностью железнодорожной инфраструктуры, особенно это стало критичным в условиях изменений маршрутов перевозок последнего года, переориентации логистических потоков на восток и увеличения среднего расстояния перевозки, что потребовало расширения спектра предоставляемых услуг. Операторы превращаются в транспортно-логистические компании с широким спектром услуг по планированию и организации перевозки, комплексному транспортно-логистическому обслуживанию, администрированию интересов клиентов и организации расчетов, обеспечению безопасности и правил перевозки грузов.

Текущая ситуация на рынке нефти и нефтепродуктов, в первую очередь, рост тарифов на перевозку, заставляет грузовладельцев оптимизировать свои расходы, что в свою очередь требует повышения эффективности операционных моделей перевозчиков. Только расширения линейки сервисов недостаточно, чтобы предложить грузовладельцу нужный ему продукт по перевозке. Проблема оптимизации подвижного состава – вагонов-цистерн остается острейшей.

В данном исследовании предложен подход к решению проблемы роста операционной эффективности компании-оператора на основе рационального использования его подвижного состава.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В основе исследования лежат данные о состоянии и тенденциях рынка нефти и нефтепродуктов, определяющие потребность в настоящих и будущих перевозках. Основная масса добываемой нефти транспортируется трубопроводами (более 90 %), а вот продукты нефтепереработки (бензин,

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

дизельное топливо, БГС и другое), как правило, перевозятся железнодорожном транспортом (около 70 %).

Так, несмотря на кризисные явления последних лет, Россия остается в тройке мировых лидеров по объемам добычи нефти. В 2021 году РФ осталась на втором месте в мире по объему добычи нефти – 524,05 млн. тонн, по сравнению с 2020 годом уровень добычи повысился на 2,2 % [3]. По данным Минэнерго, добыча нефти в первом полугодии 2022 г. выросла на 3,4 % выше показателя добычи аналогичного периода предыдущего года, что отражают показатели погрузки на сети железных дорог [4] (Рис. 1).

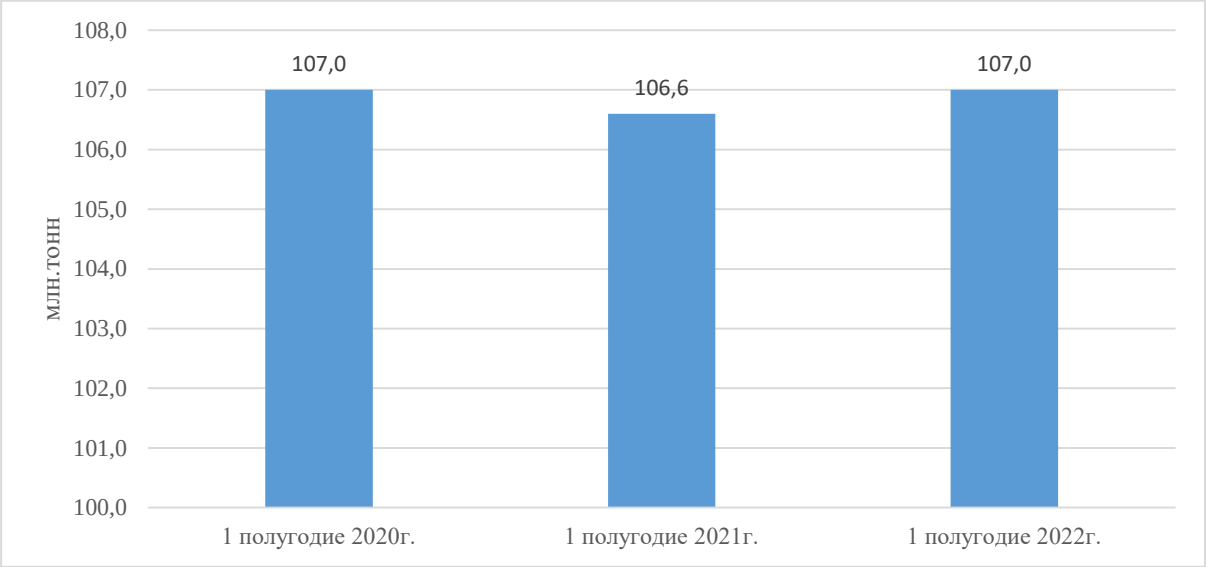


Рис. 1. Погрузка нефти и нефтепродуктов по сети РЖД в первом полугодии 2022г. в сравнении с 2021 и 2020 гг., млн. тонн.

Источник: расчеты авторов на основе данных [5]

Анализ показывает, что на данный сегмент рынка ни глобальные экономические и политические события, ни пандемия коронавируса Covid-19, практически не повлияли.

В анализе исследованы: динамика роста железнодорожных грузовых тарифов на перевозку грузов данного класса (14,8 % в год); показатели эффективности деятельности компаний – операторов (общий объем грузов, перевезенный за год в одном вагоне, отношение выручки к количеству парка в управлении и к общему объему перевозок грузов, грузооборот, объем перевозок, структура парка, средний возраст подвижного состава, динамика списания и закупок вагонного парка) [6].

Исследование построено на методе статистического анализа погрузки нефтепродуктов за период 2020–2022 гг.; общего и рабочего

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

парка цистерн за период 2021–2022 гг.; структуры парка грузовых вагонов за период 2019–2022 г.; состояния и прогноза закупок и списания вагонов за период 2018–2024 г. Использован факторный анализ причинно-следственных связей, влияющих на эффективное использование подвижного состава операторами железнодорожного транспорта.

В исследовании учтено, что вагонами-цистернами перевозятся и другие продукты, например, сжиженные углеводородные газы (далее СУГ), что требует наличия специализированного подвижного состава в надлежащем для перевозки состоянии [7].

Поскольку организация железнодорожной транспортной логистики и ограниченность инфраструктуры являются важнейшими факторами влияния на эффективность операционных моделей операторов, нами учтены показатели Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ состояния рынка перевозок нефти и нефтепродуктов и оценка потребности в их перевозке железнодорожным транспортом.

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте – это совокупность организационно и технологически взаимосвязанных операций, выполняемых при подготовке, осуществлении и завершении перевозок пассажиров, грузов, багажа и грузобагажа [8]. Его основу составляют железнодорожная инфраструктура, подвижной состав и вагоны. Вагонная составляющая перевозки формирует бизнес-модель компаний-операторов. Эффективный вагон с точки зрения операторского бизнеса – это вагон, генерирующий максимальную доходность при наименьших затратах на его функционирование. Замена парка новыми инновационными вагонами ведет как к снижению операционных затрат, так и к существенному росту капитальных затрат, но при этом обеспечивает рост эффективности их бизнес-моделей. В связи с этим компании-операторы из года в год увеличивают объемы закупок инновационного подвижного состава. Так, к концу 2022 года, доля инновационных вагонов составляет 53 % от общего объема против 41 % в 2018 году (Рис. 2).

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

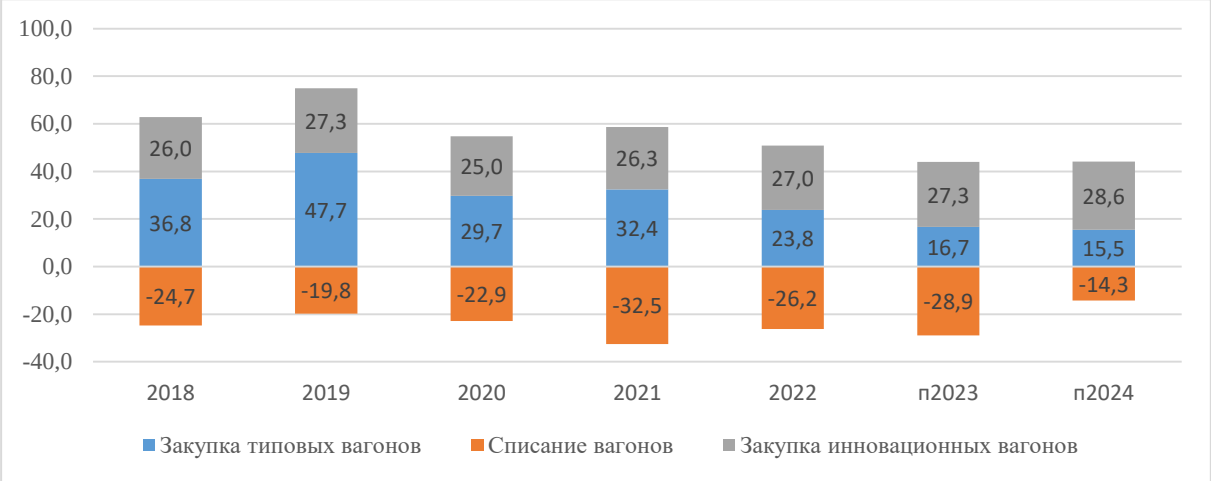


Рис. 2. Прогноз закупок и списания вагонов до 2024 г., тыс. ед.

Источник: расчеты авторов на основе данных [9].

Оптимизация затрат на поддержание парка вагонов в надлежащем технически исправном состоянии, соответствующем требованиям безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, является важнейшей проблемой эффективности деятельности операторов.

Проведенный анализ показывает, что объем и состояние парка цистерн основного подвижного состава для перевозки нефтеналивных грузов за последние годы претерпели значительные изменения.

Активный парк цистерн (за исключением цистерн в нерабочем парке) на сети РЖД по состоянию на конец 2 полугодия 2022 составил 252,6 тыс. ед., что выше показателя декабря 2021 г. на 0,2 % или на 0,6 тыс. ед. (Рис. 3).

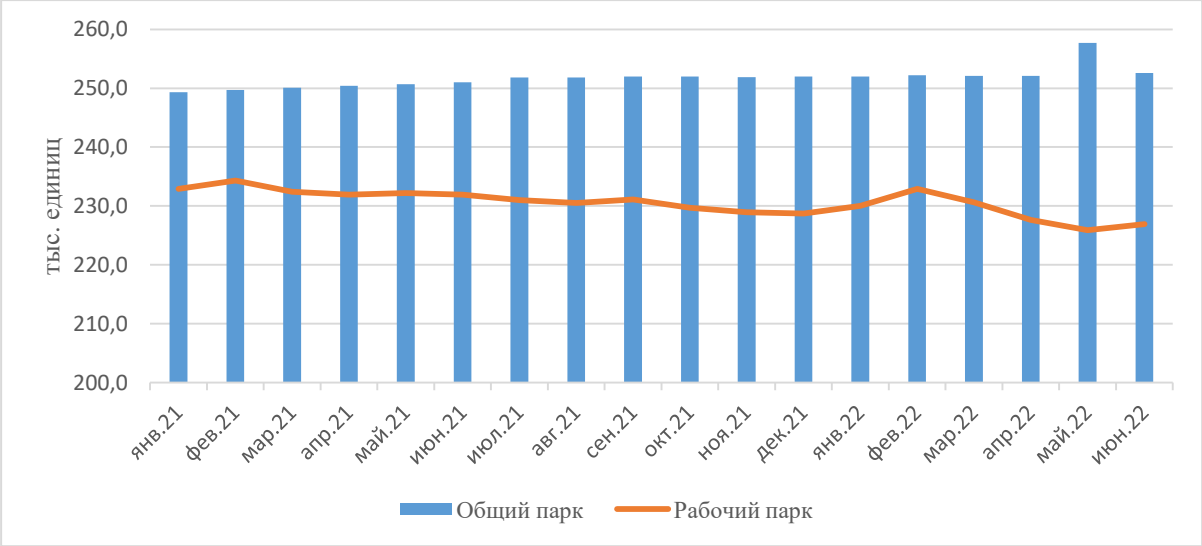


Рис. 3. Динамика общего и рабочего парка цистерн в 2021–2022 гг., тыс. единиц

Источник: расчеты авторов на основе данных [5]

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

При этом, потребности в транспортировке нефти и нефтепродуктов, претерпев существенные структурные изменения в объемах, предъявляемых к перевозке железнодорожным транспортом и направлениях перевозки, выросли. Так, на фоне введения в конце 2022 года странами ЕС эмбарго на российскую нефть, а также установленного на уровне $60 за баррель потолка цен на нее, транспортировка нефти на экспорт трубопроводным и морским транспортом снизился в декабре 2022 года на 11 % относительно прошлого месяца (560 тыс. тонн в сутки). При этом, растет потребность в перевозке нефтепродуктов, что показывает рост загрузки российских НПЗ на 1,5 % или до 794 тыс. тонн в сутки. Сопоставляя объемы нефти и нефтепродуктов, предъявляемых к перевозке железнодорожным транспортом с возможностью железнодорожных операторов, очевиден дефицит вагонов – цистерн [10].

2. Анализ факторов и причинно-следственных связей, влияющих на эффективное использование подвижного состава операторами железнодорожного транспорта.

По данным информационного агентства «INFOLine» к концу 2022 г. задействованный в перевозочном процессе подвижной состав российских собственников (в ноябре) достиг нового исторического максимума в 1,15 млн. единиц, а незадействованный, напротив, находится на минимальных более чем за 3 года уровнях. При этом нарастает дефицит вагонов.

Первым фактором дефицита вагонов является преобладание списания вагонов над их производством. Производство вагонов в большей степени ориентировалось на максимальный с 2014 г. спрос на грузовые вагоны. В 2019 г. было списано 19,8 тыс., а закуплено – 75 тыс. В 2021 г. закупки грузовых вагонов почти достигли уровня 2018 г., а списание выросло до 25,7 тыс. В 2022 г. объемы списания (без учета заблокированных на Украине и национализированных вагонов) превысили 21 тыс. Высокий процент списания грузовых вагонов привел к дефициту подвижного состава на сети РЖД.

Что касается нефтеналивных цистерн, то за период с 2019 по первое полугодие 2022 г. было списано 14,0 тыс. цистерн и закуплено 13,8 тыс. цистерн (Рис. 4). За первое полугодие 2022 г. парк цистерн сократился на 6,91 тыс. единиц [11]. Производство цистерн за последние 8 лет сократилось в 10 раз, с 2000 единиц в 2016 году до 212 цистерн в 2021 году.

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

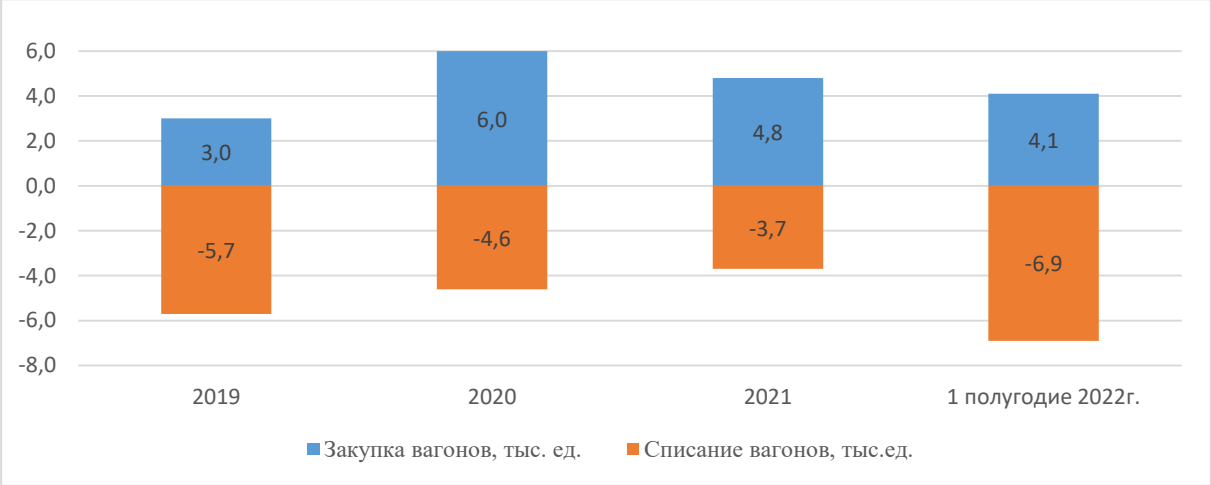


Рис. 4. Изменение структуры парка грузовых вагонов

Источник: расчеты авторов на основе данных [9]

С 2022 года производство всех видов грузовых вагонов стало снижаться по разным причинам [12]. Так, производители инновационных вагонов с повышенной грузоподъемностью со II квартала 2022 г. испытывают проблемы с приобретением кассетных подшипников, производство которых характеризуется высокой консолидацией и по ключевым комплектующим зависит от импорта. После начала специальной операции на Украине компании-производители с иностранным участием, такие как: Amsted Rail, SKF и Timken приняли решение прекратить бизнес в России. В ряде компаний идут процессы реформирования, например, «Тимкен» вышло из совместного предприятия с НПК «ОВК»; ООО «Тимкен ОВК», «Бренко» – из группы «ЕПК-Бренко». ООО «СКФ» переименовано в «Тек-Ком Производство», линейка которого пока полностью не восстановлена. Ряд заводов, в частности, ОВК заказы принимает, но «без выхода на сеть до конца 2022 года». Более того, основные производители уже законтрактованы на этот год и частично на 2024-й. общая недопоставка цистерн серьезно скажется на рынке сырья и его ценах. [13].

Процесс модернизации вагонов потерял смысл после приказа Минтранса России от 25.12.2015 № 382 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации», который ввел запрет на продление сроков службы вагонов 353 моделей, которые эксплуатируются на сети железных дорог. Было разрешено модернизировать только 42 модели вагонов-цистерн [14].

Второй пик списания ожидается в 2024-2026 гг. и составит более 10 тыс. вагонов ежегодно.

Received: 25.04.2023 Revised: 30.05.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 25.04.2023 Одобрена: 30.05.2023 Принята: 30.06.2023

Вторым фактором дефицита вагонов-цистерн является использование подвижного состава в качестве «склада на колесах». В связи с тем, что нефтеперерабатывающие заводы производят продукцию непрерывно, осуществление остановки выработки продукции невозможно, а нефтехранилища на территории предприятия ограничены, в связи с наложенными санкциями на РФ отгрузка в порты ограничена, в следствии чего заводы вынуждены осуществлять погрузку в железнодорожный подвижной состав и отставлять груженные вагоны в отстой с целью ожидании согласования отправки в порты.

Так, на начало 2022 года среднесуточное количество груженых вагонов-цистерн, брошенных и находящихся в отстое на сети РЖД, достигло 9 тыс. единиц. Данный показатель в 2,4 раза больше, чем годом ранее и за 5 лет (2017–2021 годы) [15].

Операторы подвижного состава сообщают, что проблема носит системный характер, и в последнее время отмечается тенденция к ухудшению ситуации.

Кроме того, чтобы компенсировать застрявший в пути парк, грузоперевозчики вынуждены посылать дополнительные вагоны и нести финансовые потери.

Третьим фактором, который влияет на рост дефицита подвижного состава, является снижение объемов транспортировки нефти трубопроводным транспортом и переход этих объемов на железнодорожный, а также рост потребности в перевозке нефтепродуктов. После введения санкций со стороны ЕС направление отгрузок нефтепродуктов было изменено с портов Северо-Запада на восточный полигон. Несмотря на то, что транспортировка нефтепродуктов трубопроводным транспортом значительно дешевле, чем железнодорожным, ограниченность трубопроводной инфраструктуры заставляет производителей уходить на железнодорожный транспорт. Компания «Транснефть» впервые с 2016 года отгрузила пробную партию нефтепродуктов в направлении порта Козьмино [16]. Данное направление не использовалось после запуска трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан 2», в настоящий момент комплекс загружен на 100 %.

Дальнейшее переключение нефтегрузов на железнодорожный транспорт потенциально влечет дефицит железнодорожных вагон-цистерн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил систематизировать факторы, влияющие на рынок подвижного состава, а именно вагонов-цистерн, по итогу оценки выявлены следующие проблемы:

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

– увеличение объемов перевозки нефти и нефтепродуктов;

– сокращение парка цистерн (пик списания ожидается в 2035 году, когда срок службы одновременно истечет у 23,2 тыс. вагонов);

– запрет продления сроков службы вагонов;

– сокращение производства вагонов цистерн вагоностроительными заводами;

– сокращение видов груза, перевозимых вагон-цистернами;

– использования подвижного состава, как «склад на колесах»;

– для сохранения данного сегмента рынка и укрепления на нем компаний-операторов необходимо обратить внимание на следующие направления:

– развитие производства и эксплуатации инновационных цистерн;

– ускорение оборота подвижного состава на станциях выгрузки путем точечного планирования подвода подвижного состава на выгрузку;

– развитие новых сервисов и оптимизация тарифной политики по перевозке нефтепродуктов, используя инструменты тарифного коридора, что позволит компенсировать уходящие объемы перевозок на трубопроводный транспорт;

– наращивание объема погрузки в танк-контейнерах, что привлечет клиентов среднего и малого бизнеса и увеличит объемы перевозки. Транспортировка с помощью танк-контейнеров позволяет перевозить практически все нефтехимические грузы, гарантируя высокую безопасность перевозки, и дает возможность использования подвижного состава не только как транспортного средства, но и как хранилища для химических грузов. Кроме того, танк-контейнеры незаменимы при мультимодальных перевозках, особенно в труднодоступные районы где отсутствует железнодорожная инфраструктура;

– разработка новых логистических схем поставок нефти по железной дороге и ввод в действие новых нефтеперерабатывающих предприятий.

НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные исследования в отношении оптимизации затрат и повышения эффективности деятельности операторов железнодорожного транспорта в современных условиях связаны с анализом роста затрат на текущее содержание подвижного состава и оценкой влияния снижения уровня цен на основные нефтепродукты на железнодорожные тарифы;

В качестве одного из вариантов решения данных задач предлагается рассмотреть реализацию долгосрочных проектов по производству инновационных вагонов-цистерн с повышенной грузоподъемностью и сроком службы, что позволит в перспективе сократить затраты на текущее

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

содержание подвижного состава и необходимость меньшего количества подвижного состава для сохранения действующих объемов перевозок.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Хусаинов Ф.И., Ожерельева М.В. Перевозки угля и нефтеналивных грузов железнодорожным транспортом: текущее состояние и перспективы // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2019. – Т. 4(83). – С. 22–27. [Khusainov FI, Ozhereleva MV. Transportation of coal and oil cargoes by rail transport: current state and prospects. *Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics.* 2019;4(83):22-27 (In Russ.)]. Доступно по: https://elibrary.ru/item.asp?id=39543741 Ссылка активна на: 15.12.2022.
2. Исследование «Рынок грузового железнодорожного транспорта РФ. Тенденции 2020 г. Прогноз до 2023 года». Информационное агентство «INFO Line» [Study “Freight rail transport market of the Russian Federation. Trends 2020. Forecast until 2023”. News agency «INFO Line» [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: http://infoline.spb.ru/
3. Алифирова Е. Россия в 2021 г. увеличила добычу нефти на 2,2 %, газа – на 10 %. Информационный портал Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. [Alifirova E. Russia v 2021 uvelichila dobychu nefti na 2,2 %, gaza – na 10 %. IA portal Neftegaz.RU [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://neftegaz.ru/news/finance/719930-rossiya-v-2021-g-uvelichila-dobychu-nefti-na-2-2-gaza-na-10/?ysclid=l9n0awlc5y735517915
4. Добыча нефти в России за первое полугодие выросла на 3,4 %. Информационное агентство «Интерфакс» [Электронный ресурс]. [Dobycha nefti v Rossii za pervoe polugodie vyrosla na 3,4 %. News agency “Interfax” [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.interfax.ru/business/853277 Ссылка активна на: 15.12.2022.
5. Союз операторов железнодорожного транспорта. [Union of Railway Transport Operators [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: http://railsovet.ru/
6. Тимофеев А.Г., Лебединская О.Г. Модель PMG/ARDL прогнозирования цены на сырую нефть в условиях неопределенности // Транспортное дело России. – 2022. – Т. 2(159). – С. 16–19. [Timofeev AG, Lebedinskaya OG. PMG/ARDL model for crude oil price forecasting under uncertainty. *Transport business in Russia.* 2022;2(159):16-19 (In Russ.)]. doi: 10.52375/20728689_2022_2_16
7. Ефимова О.В., Бабошин Е.Б., Пшукова К.А. Развитие экосистемы безопасности в контексте целей устойчивого развития для устранения потерь транспортной организации // Транспортное дело России. – 2022. – Т. 2(159). – С. 124–126. [Efimova OV, Baboshin EB, Pshukova KA. Development of a safety ecosystem in the context of sustainable development goals to eliminate losses of the transport organization. *Transport business in Russia.* 2022;2(159):124-126 (In Russ.)]. doi: 10.52375/20728689_2022_2_124

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

8. Договор о Евразийском экономическом союзе (Подписан в г. Астане 29.05.2014) (ред. от 24.03.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 03.04.2023). Приложение № 2 к Протоколу о скоординированной (согласованной) транспортной политике. Порядок регулирования доступа к услугам железнодорожного транспорта, включая основы тарифной политики. [Dogovor o Eurasiiskom ekonomicheskom soyuze (Podpisan v Astane 29.05.2014) (rev. of 24.03.2022) (as am. and sup. enter into force 03.04.2023). Prilozhenie N2 k Protokolu o skoordinirivannoi (soglasovannoi) ransportnoi politike. Poryadok regulirovaniya dostupa k uslugam zheleznodorozhnogo transporta, vklyuchaya osnovy tarifnoi poitiki. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.04.2023. Доступно по: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163855/b3e81df236f3bfb1e9e4b346213b7fab0d287b1b/

9. АО «Государственная транспортная лизинговая компания» (ГТЛК) [Электронный ресурс] [AO Gosudarstvennaya transportnaya lizingovaya kompaniya (GTLK). [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://www.gtlk.ru/

10. Шкарупа А.А. Промышленность России: итоги 5 месяцев 2022 года // Техника железных дорог. – 2022. – Т. 3(59). – С. 12–17. [Shkarupa AA. Russian industry. Five month of 2022 results. *Railway Equipment Journal*. 2022;2(58):30-36. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tmmwjg Ссылка активна на: 02.05.2023.

11. Федеральная служба государственной статистики «О промышленном производстве в I полугодии 2022 года». [Rosstat. O promyshlennom proizvodstve v I polugodii 2022 goda. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/123_27-07-2022.html Ссылка активна на: 15.12.2022.

12. Саакян Ю.З. 15 лет развития железнодорожного машиностроения России: итоги и перспективы // Техника железных дорог. – 2023 – Т. 1(61). – С. 10–19. [Saakyan YuZ. 15 years of development of railway engineering in Russia: results and prospects. *Railway Equipment Journal*. 2023;1(61):10-19. (In Russ.)]. Доступно по: https://ipem.ru/content/%D0%A2%D0%96%D0%94/%D0%A2%D0%96%D0%94%20061%20(1)%20%D1%84%D0%B5%D0%B2%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%202023.pdf Ссылка активна на: 02.05.2023.

13. Алешина А. Дефицит цистерн нарастает: производители законтрактовали программу на будущий год. Информационное агентство «РЖД-Партнер.ру». 06.12.2022. [Aleshina A. Deficit cistern narastaet: proizvoditeli zakontraktovali programmu na budushchiy god. IA “RZD-Partner.ru”. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/defitsit-tsistern-narastaet-proizvoditeli-zakontraktovali-programmu-na-budushchiy-god/ Ссылка активна на: 27.12.2022.

14. Приказ Минтранса России от 25.12.2015 № 382 «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные приказом Министерства транспорта Российской Федерации, утвержденный приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 года № 286». [Prikaz Mintransa Rossii 25.12.2015 N 382 “O vnesenii izmeneniy v Pravila technicheskoy expluatacii zheleznyh dorog Rossiiskoy Federacii, utverzhdenniy prikazom Ministerstva transporta Rossiiskoy Federacii 21.12.2010 N 286”. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.12.2022. Доступно по: https://mintrans.gov.ru/documents/7/4630

Received: 25.04.2023 **Revised: 30.05.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 25.04.2023 **Одобрена: 30.05.2023** **Принята: 30.06.2023**

15. Свинцова Е. 9 тыс. цистерн с нефтепродуктами оказались брошены на сети РЖД. Информационный портал Neftegaz.RU. [Svintsova E. 9000 cistern s nefteproduktami okazalis' brosheny na seti RZD. IA portal Neftegaz.RU. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/719305-9-tys-tsistern-s-nefteproduktami-okazalis-brosheny-na-seti-rzhd/?ysclid=l9n2bsyrck37707167 Ссылка активна на: 15.12.2022.
16. Пробную партию нефти доставили в порт Козьмино по железной дороге. Агентство экономической информации «Прайм». [Probnuyu partiyu nefti dostavili v port Koz'mino po zheleznoy doroge. Business news agency PRIME. [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: https://1prime.ru/oil/20221004/838347919.html Ссылка активна на: 02.05.2023.

Сведения об авторах:
Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Печкуров Вадим Андреевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 2054-3333; ORCID: 0009-0005-2087-210X;
E-mail: vadimpechkurov@mail.ru

Information about the authors:
Natalia A. Zhuravleva, Doctor of Economics, Professor;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Vadim A. Pechkurov, postgraduate student;
eLibrary SPIN: 2054-3333; ORCID: 0009-0005-2087-210X;
E-mail: vadimpechkurov@mail.ru

Цитировать:
Журавлева Н.А., Печкуров В.А. Анализ состояния рынка вагонов-цистерн в России и оптимизация операционных моделей компаний операторов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 97–109. doi: 10.17816/transsyst20239297-109

To cite this article:
Zhuravleva NA, Pechkurov VA. Analysis of the tank car market in Russia and optimization of operating models of operator companies. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;9(2):97-109. doi: 10.17816/transsyst20239297-109

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.025.6
DOI 10.17816/transsyst202392110-120

© С.А. Смирнов, О.Ю. Смирнова
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПЕРСПЕКТИВЫ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА В ЕДИНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ ЕВРАЗИЙСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОЮЗА

Обоснование: Изменения в геополитической обстановке, начавшиеся в 2022 году, оказали влияние на транспортную отрасль Российской Федерации и государств-членов Евразийского экономического союза. Возникла необходимость реорганизации производственно-сбытовых цепочек и формирования логистических маршрутов с учетом новых реалий при соблюдении взаимных интересов всех участников транспортных и экономико-географических процессов. Продолжается развитие евразийских транспортных коридоров и реализация инфраструктурных проектов с использованием инновационных подходов.

Цель: рассмотреть перспективы использования магнитолевитационной транспортной технологии на пространстве государств-членов Евразийского экономического союза.

Материалы и методы: методология исследования построена на анализе методов логистики, социально-экономического анализа, а также макроэкономических методов. Информационная база исследования опирается на официальную правовую и методическую информацию органов власти Российской Федерации и Евразийской экономической комиссии.

Результаты: в результате исследования определена ниша магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза, на качественном уровне описаны ожидаемые эффекты от внедрения магнитолевитационного транспорта.

Заключение: исследование подтверждает, что в современных условиях необходимы инновационные логистические решения для развития международных транспортных коридоров. Предложенный нейрологистический подход обосновывает необходимость и эффективность внедрения магнитолевитационного транспорта в единую интегрированную транспортную систему Евразийского экономического союза в качестве ее неотъемлемого элемента.

Ключевые слова: международные транспортные коридоры, единая интегрированная транспортная система, логистика, нейрологистический подход, магнитолевитационный транспорт, Евразийский экономический союз.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S.A. Smirnov, O.Yu. Smirnova
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

PROSPECTS OF MAGLEV TRANSPORT IN THE UNIFIED INTEGRATED TRANSPORT SYSTEM OF THE EURASIAN ECONOMIC UNION

Background: The changes in the geopolitical situation that began in 2022 had an impact on the transport industry of the Russian Federation and the member countries of the Eurasian Economic Union. There was a need to reorganize supply chains and form logistics routes taking into account new realities while respecting the mutual interests of all participants in transport and economic and geographical processes. The development of Eurasian transport corridors and the implementation of infrastructure projects using innovative approaches continues.

Aim: to consider the prospects of using maglev transport technology in the space of the member countries of the Eurasian Economic Union.

Materials and methods: the research methodology is based on the analysis of logistics methods, socio-economic analysis, as well as macroeconomic methods. The information base of the study is based on official legal and methodological information of the authorities of the Russian Federation and the Eurasian Economic Commission.

Results: as a result of the study, the niche of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian Economic Union is determined, the expected effects of the introduction of maglev transport are described at a qualitative level.

Conclusion: the study confirms that innovative logistics solutions are needed in modern conditions for the development of international transport corridors. The proposed neuro-linguistic approach substantiates the necessity and effectiveness of the introduction of maglev transport into a unified integrated transport system of the Eurasian Economic Union as its integral element.

Key words: international transport corridors, unified integrated transport system, logistics, neurological approach, magnetic levitation transport, Eurasian economic union.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные коридоры, проходящие через территорию государств-членов Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС), определены на нормативном уровне.

До недавнего времени развитие наземных транспортных коридоров «Восток–Запад» реализовывалось преимущественно в рамках инициативы Китая «Один пояс – один путь»: требовалось регулярное движение товаров в государства Европейского союза.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Часть грузов переориентировалось с морского маршрута через Суэцкий канал на сушу, но их доля оставалась незначительной в общей структуре перевозок. Однако факторы скорости, ритмичности и стоимости перевозок, эффективности работы с неравномерным грузопотоком позволяли формировать конкурентные преимущества сухопутным маршрутам.

Ввиду изменений на международной арене с февраля 2022 года, во-первых, Россия и Беларусь оказались фактически вычеркнуты из международного транзита на коридоре «Восток–Запад». Одновременно с этим под вопросом оказалась устойчивость морского маршрута через Суэцкий канал. Как показала геополитическая практика, введение рядом стран массовых ограничений возможно в достаточно сжатые сроки и в узком консенсусе. Дальнейшее развитие устойчивых сухопутных коридоров по территориям стабильных во внешнеполитическом отношении стран получило особую важность (Рис. 1) [1].

Во-вторых, интенсифицировались экспортно-импортные перевозки в Россию. Произошла переориентация грузопотоков на восток, что вызвало рост нагрузки на транспортные сети на этом направлении. Соответственно, образовался дефицит провозных способностей.

И в-третьих, наметилась тенденция укрепления направления «Север – Юг», способствующая изменению грузопотоков [2, 3].

Таким образом, транспортно-логистическая система государств-членов ЕАЭС и соседних стран, не входящих в состав ЕАЭС, претерпела значительные изменения. Новые конфигурации выразились не только в смене вектора грузопотоков, но и в появлении принципиально новых для транспортных систем государств-членов ЕАЭС условий [4].

ВЫЗОВЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЕАЭС

Современная ситуация, которая характеризируется высокой турбулентностью и неопределенностью, как в отношении цепочек поставок, так и в отношении объемов поставок и условий работы, требует высочайшей гибкости в организации логистики. Устойчивость транспортных коридоров становится одной из наиболее важных характеристик. При этом транспортный коридор приобретает очертания своеобразной нейросети, способной создавать вариативность маршрутов и обеспечивать оперативное замещение слабых или перегруженных участков.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

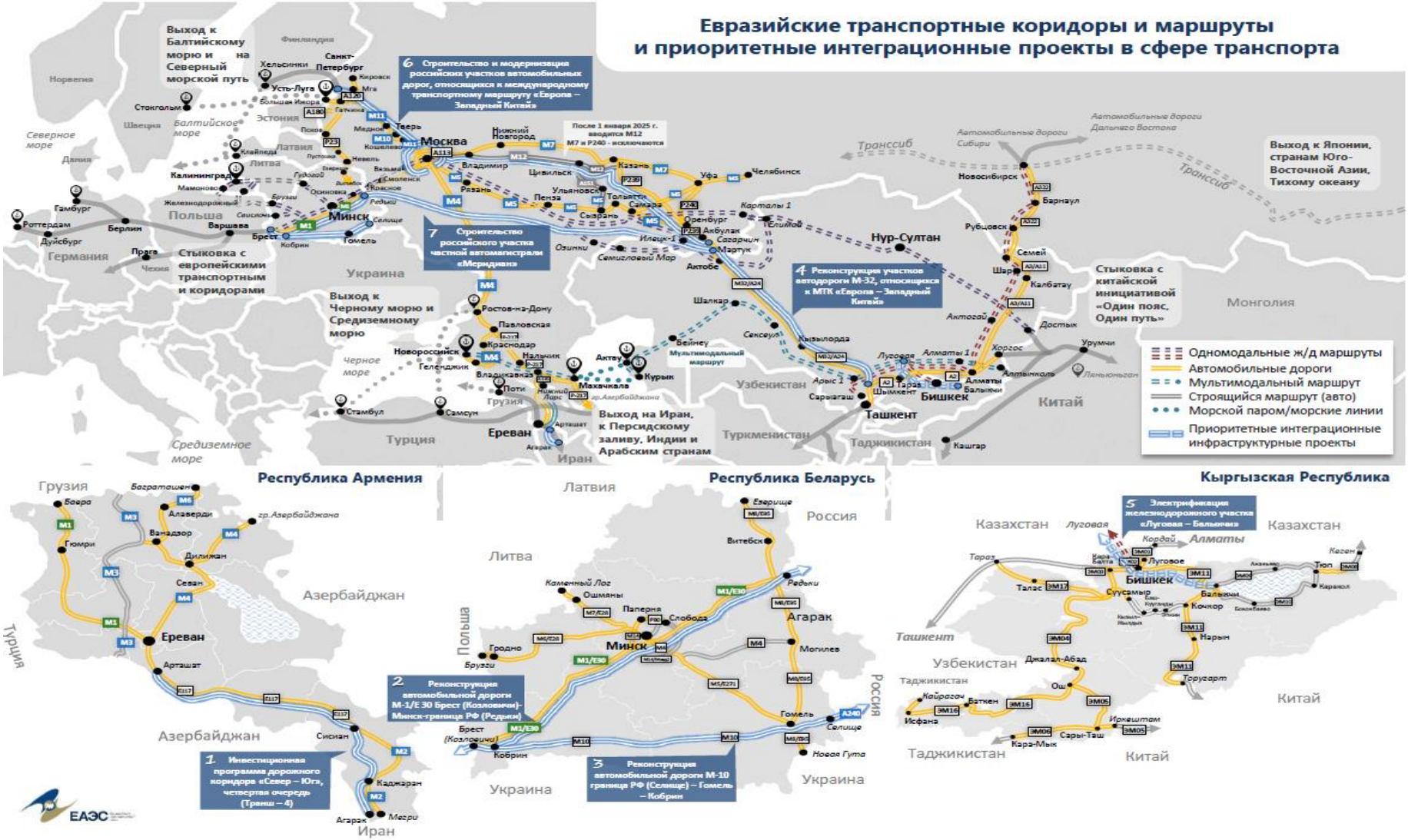


Рис. 1. Транспортные коридоры Евразийского экономического союза

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Следует констатировать, что уровень текущего развития транспортной инфраструктуры государств-членов ЕАЭС, а также Китая не соответствует необходимому. Ограниченность вариантов маршрутов поставок и емкости отдельных маршрутов, наличие инфраструктурных барьеров сдерживает исполнение реальных объемов потребностей в перевозках. Это, в свою очередь, сдерживает экономическое развитие стран, на территории которых расположена актуальная и перспективная транспортная инфраструктура. Вместе с этим нельзя не отметить, что в текущих условиях реализация инфраструктурных проектов не должна осуществляться в течение десятилетий. Скорость реализации такой нейрологистики напрямую будет влиять на экономическое благополучие государств-членов ЕАЭС и определять его на годы вперед.

Создание эффективной нейрологистической сети возможно только на основе единой интегрированной транспортной системы:

– все виды транспорта обладают определенной степенью взаимозаменяемости и взаимно дополняют друг друга в единой транспортной системе;

– потенциал грузооборота и пассажирооборота на пространстве ЕАЭС существенно превышает наличные возможности транспортной инфраструктуры;

– достигается оперативная гибкость в логистике.

При этом номенклатура видов транспорта должна быть дополнена магнитолевитационным – транспортом, позволяющим достичь необходимого уровня инновационности транспортной системы по перевозочным характеристикам (Рис. 2).

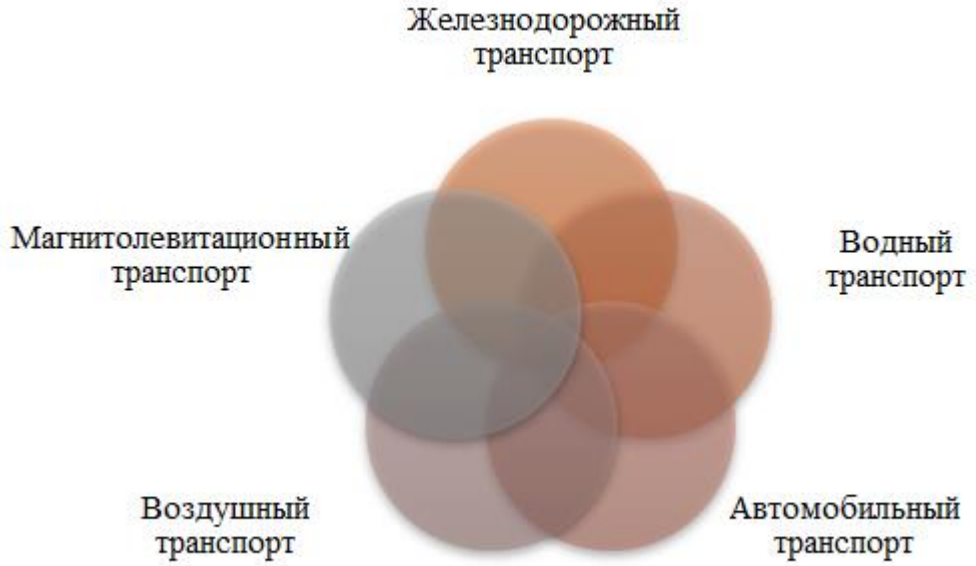


Рис. 2. Модель единой интегрированной транспортной системы

Received: 10.05.2023 Revised: 27.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 Одобрена: 27.06.2023 Принята: 30.06.2023

МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫЙ ТРАНСПОРТ: ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В транспортной сфере физическое явление магнитной левитации используется в целях исключения физического взаимодействия пути и подвижного состава, в результате чего решаются различные фундаментальные проблемы – от сил сопротивления движению до износа элементов транспортной системы.

Технология магнитной левитации не нова и ведет отсчет с 1911 г. Серьезные исследования и работы проводились в мире по официальным данным с 1960-х гг. К XXI веку уровень развития технологии позволил достичь экономической целесообразности ее внедрения. С тех пор технология дешевеет [5, 6].

В настоящее время в трех странах мира – в Китае, России и Японии – магнитолевитационная транспортная технология отражена в основополагающих документах стратегического транспортного планирования [7–9]. Магнитолевитационная транспортная технология развивается на всех континентах, количество перспективных проектов увеличивается (Табл. 1) [10].

Таблица 1. Перспективные магнитолевитационные транспортные проекты мира

Страны / Континенты	Магнитолевитационные транспортные проекты
Китай	• Национальный транспортный план на 2021-2035 гг.: строительство 6 600 км новых высокоскоростных линий; • Постепенный перевод ВСМ на магнитную левитацию; • Развитие маглев-систем для мегаполисов
Япония и Южная Корея	• Высокоскоростная линия Токио–Нагоя–Осака (438 км, Япония); • Переориентация внутренних перевозок с авиатранспорта на маглев (Япония); • Строительство высокоскоростной линии Сеул–Бусан (Южная Корея)
Америка	• Проект строительства линии Балтимор–Вашингтон (США) в стадии общественных слушаний; • Проект внутригородской линии в Рио-де-Жанейро (Бразилия)
Европа	• Разработан ряд проектов в Германии, Швеции, между Германией и соседними странами, Россией; • Пройдена тестовая эксплуатация грузовой линии в порту Гамбург; • Разрабатывается проект городской линии в г. Мюнхен (Германия)

Отечественные разработки в области магнитолевитационного транспорта находились на высоком уровне до 1990-х гг. Однако по объективным причинам к 2010-м гг. Россия в данной сфере оказалась в роли догоняющей [11].

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

К настоящему моменту разработки современных российских инженеров и ученых проявились в создании технологии «Российский Маглев» (далее – «РосМаглев»), которая кратно превзошла зарубежные аналоги по эффективности и может обеспечивать массовые перевозки грузов. Технология позволяет осуществлять транспортировку на высоких скоростях, проявляет гибкость в отношении массогабаритных характеристик перевозимых грузов, обеспечивает перевозки малых партий грузов за счет самостоятельного движения отдельных транспортных единиц, и, что важно в текущих экономических условиях, имеет быстро возводимую инфраструктуру.

Наиболее значимыми особенностями магнитолевитационного транспорта являются:

– гибкое приспособление инфраструктуры к ландшафту;
– возможность строительства практически в любых условиях;
– быстрое возведение инфраструктуры при ее низкой стоимости;
– малые объемы обслуживания инфраструктуры при высокой пропускной способности;
– высокая коммерческая скорость и приспосабливаемость под определенные нужды;
– низкие расходы на эксплуатацию подвижного состава;
– низкая стоимость жизненного цикла;
– отсутствие износа от физического контакта;
– высокие экологические характеристики (Табл. 2).

Технический облик транспортной системы на базе технологии «РосМаглев» представлен на Рис. 3.

Таблица 2. Особенности технологии «РосМаглев»

Параметр	Характеристика параметра
Особенности строительства	• Не требует использования тяжелой техники для строительства (масса 1 м пути до 7,5 т, против 22-29 т ж.д. пути, нагрузка 1 кг/см^2 против 5 000-10 000 кг/см^2 для ж.д.); • Установка модульных конструкций; • Землеотвод 7,2 м (для ж.д. 20 м)
Сроки и стоимость строительства	• Срок строительства 100 км пути 6-9 мес. (для ж.д. 39 мес.); • Стоимость 1 км пути составляет около 50% от стоимости строительства ж.д.
Эксплуатация инфраструктуры	• Малообслуживаемая, низкий объем ремонтов; • Пропускная способность до 30 раз выше, чем на ж.д
Эксплуатация подвижного состава	• Коммерческая скорость до 250 км/ч (на ж.д. транспорте – до 40 км/ч); • Срок жизненного цикла 50-100 лет; • Отсутствие жестких ограничений по габаритам и грузоподъемности

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

Параметр	Характеристика параметра
Расходы	• Малый объем обслуживания подвижного состава; • Потребность в подвижном составе в 4-8 раз ниже ж.д., нет потребности в локомотивах; • Эксплуатационные расходы на 30-50 % ниже ж.д.
Эффективность и экологичность	• Стоимость 1 года жизненного цикла в 2,5 раза ниже, чем на ж.д.; • Отсутствие износа от трения и ударных нагрузок; • Отсутствие выбросов пыли, ГСМ, тяжёлых металлов

Источник: составлено авторами

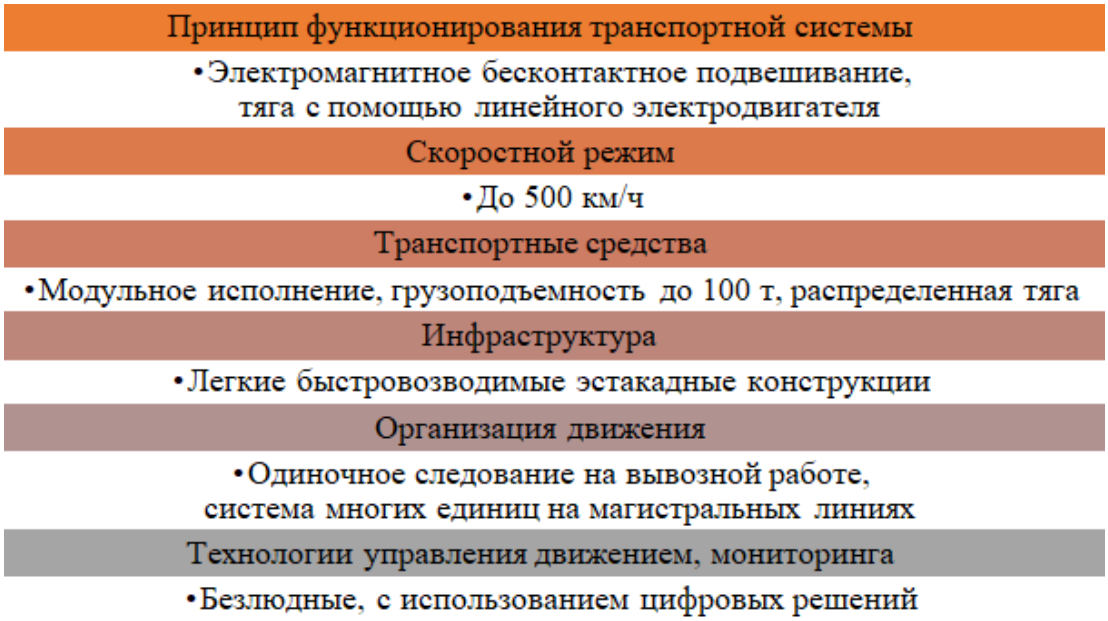


Рис. 3. Технический облик транспортной системы на базе технологии «РосМаглев»

Магнитолевитационный транспорт в единой интегрированной транспортной системе может использоваться в следующих направлениях:

- вывозные линии в портовой логистике – транспортировка грузов между причалом и складом временного хранения, «сухим портом»;
- сбор партий грузов с предприятий и складов на крупные терминалы – сборка малых партий грузов одиночно следующими левитационными вагонами на станции формирования железнодорожных составов;
- межтерминальная безостановочная транспортировка грузов – перевозка грузов без перегрузок, ландшафтных барьеров, таможенных барьеров, минуя сложности с преодолением территорий других стран по выделенной эстакаде;
- перевозка груженых автомобилей в режиме контрейлера – погрузка автомобилей (в том числе, груженых) для преодоления естественных и искусственных преград, спрямления маршрута.

Received: 10.05.2023 Revised: 27.06.2023 Accepted: 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 Одобрена: 27.06.2023 Принята: 30.06.2023

В результате внедрения технологии «РосМаглев» в единую интегрированную транспортную систему государств-членов ЕАЭС ожидается ряд положительных изменений, вызванных улучшением транспортно-логистической сети (Рис. 4).

Рис. 4. Влияние технологии «РосМаглев» на транспорт ЕАЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Единая интегрированная транспортная система Евразийского экономического союза находится в стадии становления. В изменившихся условиях повысились требования к ее гибкости и эффективности. Магнитолевитационный транспорт на основе технологии «Российский Маглев» на пространстве государств-членов Евразийского экономического союза предлагает существенную технологическую и экономическую полезность. Ключевым фактором, обеспечивающим ее, является возможность быстрой прокладки магистралей в любых природных условиях. Интеграция магнитолевитационного транспорта в единую транспортную систему государств – членов ЕАЭС позволяет кардинально повысить технологическую и экономическую эффективность их транспортных систем, в том числе сглаживая проблемы недостаточной провозной способности отдельных участков транспортной сети и объектов терминально-логистического хозяйства.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Минобрнауки России (Постановление Правительства РФ от 13.05.2021 № 729).

Received: 10.05.2023 **Revised:** 27.06.2023 **Accepted:** 30.06.2023
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена:** 27.06.2023 **Принята:** 30.06.2023

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Официальный портал Евразийского экономического союза. [Oficial'nyj portal Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.06.2023. Доступно по: http://www.eaeunion.org
2. Аналитический доклад «О макроэкономической ситуации в государствах-членах Евразийского экономического союза и предложениях по обеспечению устойчивого экономического развития». [Analiticheskij doklad «O makroekonomicheskoj situacii v gosudarstvah-chlenah Evrazijskogo ekonomicheskogo soyuza i predlozheniyah po obespecheniyu ustojchivogo ekonomicheskogo razvitiya». (In Russ.)]. Доступно по: https://eec.eaeunion.org/upload/medialibrary/b59/Analytical_report_2022.pdf Ссылка активна на: 15.06.2023.
3. Под председательством Алексея Оверчука состоялось заседание Совета Евразийской экономической комиссии. [Pod predsedatel'stvom Alekseya Overchuka sostoyalos' zasedanie Soveta Evrazijskoj ekonomicheskoj komissii. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://government.ru/news/48311/
4. Логинов В. Встречи и предложения: зачем главы правительств ЕАЭС и СНГ собрались в Сочи [Loginov V. Vstrechi i predlozheniya: zachem glavy pravitel'stv EAES i SNG sobralis' v Sochi. (InRuss.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: https://iz.ru/1524991/valentin-loginov/vstrechi-i-predlozheniia-zachem-glavy-pravitelstv-eaes-i-sng-sobralis-v-sochi
5. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 204–220. [Smirnov SA, Smirnova OY. Evaluation of effectiveness of different transport modes for regular mass freight transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):204-220. (Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734204-220
6. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Особенности оценки социально-экономических эффектов, возникающих в результате строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 142–156. [Smirnov SA, Smirnova OY. Features of the assessment of socio-economic effects arising from the construction of lines of freight maglev transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):142-156. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst202283142-156
7. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г.: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р [Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 g.: utv. Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf
8. Устойчивое развитие транспорта в Китае. Информационное бюро Государственного совета Китайской Народной Республики. [Ustojchivoe razvitie transporta v Kitae. Informacionnoe byuro Gosudarstvennogo soveta Kitajskoj Narodnoj Respubliki.

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

(In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695320/1695320.htm

9. Shibayama T. Japan's transport planning at national level, natural disasters, and their interp lays. *European Transport Research Review*. 2017;9(3). doi: 10.1007/s12544-017-0255-7
10. Официальный портал Международного совета по магнитной левитации. [Oficial'nyj portal Mezhdunarodnogo soveta po magnitnoj levitacii. (In Russ.)]. Ссылка активна на 15.06.2023. Доступно по: https://www.maglevboard.net/
11. Ульянов Н. Магнит тянет в полет. [Ul'yanov N. *Magnit tyanet v polet*. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 15.06.2023. Доступно по: https://expert.ru/expert/2021/18/magnit-tyanet-v-polet/

Сведения об авторах:
Смирнов Сергей Александрович, ведущий научный сотрудник, руководитель НОЦ ПП имени А.А. Зайцева;
eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Смирнова Ольга Юрьевна, старший научный сотрудник, заместитель руководителя НОЦ ПП имени А.А. Зайцева;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Information about the authors:
Sergei A. Smirnov, Leading Researcher, Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development;
eLibrary 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Olga Yu. Smirnova, Senior Researcher, Deputy Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development;
eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;
E-mail: noc-pgups@yandex.ru

Цитировать:
Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Перспективы магнитолевитационного транспорта в единой интегрированной транспортной системе Евразийского экономического союза // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 2. – С. 110–120. doi: 10.17816/transsyst2023922110-120

To cite this article:
Smirnov SA, Smirnova OYu. Prospects of maglev transport in the unified integrated transport system of the Eurasian economic union. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2023;9(2):110-120. doi: 10.17816/transsyst202392110-120

Received: 10.05.2023 **Revised: 27.06.2023** **Accepted: 30.06.2023**
Поступил: 10.05.2023 **Одобрена: 27.06.2023** **Принята: 30.06.2023**

2023;9(2)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

30.06.2023

120 страницы Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9