ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

peer-review journal

transsyst.ru

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: 190131, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9
E-mail: transsyst@mail.ru
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Редактор сайта М.Д. Боярский
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова
Верстка Д.А. Полунин

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 «Инновационные 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

16+

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024

ISSN 2782-3733 (Online)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 10 | № 3 | 2024
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Смирнов Сергей Александрович
Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок имени А.А. Зайцева 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;
Валинский Олег Сергеевич, к.т.н., ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Воробьёв Александр Алфеевич, д.т.н., доцент, Заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы», Профессор кафедры «Электрическая тяга», и.о. заведующего кафедрой «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС, Санкт-Петербург, 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;
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.

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
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
WEB- Editor M.D. Boyarsky
The Executive Editor O.Yu. Smirnova
Layout Editor D.A. Polunin

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

16+

© Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 2024

ISSN 2782-3733 (Online)

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 10 | Issue 3 | 2024
PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

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

Deputy EDITOR-IN-CHIEF
Sergey A. Smirnov
Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway transportation innovative development PGUPS, 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;
Oleg S. Valinsky, Ph.D., rector PGUPS, St. Petersburg, Russia;
Vladimir D. Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Aleksandr A. Vorobyev, Dr. Sc., Associate professor, Head of Department Mechanical Handling and Road Building Machines,Professor Electric Power Traction PGUPS, St. Petersburg, 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;
Vladimir A. Solomin, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;
Richard M. 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

ОБЗОРЫ

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

Ахтямов Р.Г.

Повышение устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов 287

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Электротехнические комплексы и системы

Быльцева В.Д., Изварин М.Ю., Ким К.К.

Системы автономного хода городского электрического транспорта 300

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Цыбин Д.Ю., Ермошин Н.А.

Анализ методов расчета водопропускных сооружений автомобильных дорог 320

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

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

Саушев А.В., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф.

Оценка эффективности неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции в системе преобразователь-электродвигатель 338

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

Лисов А.А.

Разработка системы электронного дифференциала для электромобилей на основе нейросети глубокого обучения 351

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

Аухадеев А.Э.

Применение технологий искусственного интеллекта при обосновании алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования городского электротранспорта 368

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения

Верех-Белоусова Е.И., Харламова А.В.

Применение отходов угледобычи в гражданском и дорожном строительстве 390

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

Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А.

Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге 401

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

Смердов Д.Н.

Систематизация применения полимерных композиционных материалов при проектировании мостовых сооружений 419

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Васильева М.Е., Волкова Е.М., Гурьянов А.В.

Обеспечение финансово-экономической безопасности проектов строительства транспортно-пересадочных узлов 435

CONTENTS

REVIEWS

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS
Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

Akhtyamov R.G.
Increasing resilience and selection of a strategy for restoring transport networks in extreme natural processes 287

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS
Subject – Electrotechnical complexes and systems

Byltseva V.D., Izvarin M.Yu., Kim K.K.
Systems of autonomous running of urban electric transport 300

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Tsybin D.Yu., Ermoshin N.A.
Analysis of calculation methods for road culverts structures 320

ORIGINAL STUDIES

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Saushev A.V., Belousov I.V., Bova E.V., Samoseiko V.F.
Evaluation of the effectiveness of incomplete phase pulse width modulation algorithms in the converter-electric motor system 338

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnical complexes and systems

Lisov A.A.
Development of an electronic differential system for electric vehicles based on deep neural network 351

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnical complexes and systems

Auhadeev A.E.
Application of artificial intelligence technologies at substantiation of effective control algorithms for the electrical engineering complex of urban electric transport traction electrical equipment 368

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Building structures, buildings and structures

Verekh-Belousova E.I., Kharlamova A.V.
Application of coal mining waste in civil and road construction 390

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Makhonko A.A., Lazarev Y.G., Antonyuk A.A.
Technical aspect of the operation of accelerometers as composition of a system for monitoring engineering structures of a cable-stayed bridge over the Petrovsky canal in the construction of the Western Speed Diameter highway in St. Petersburg 401

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Smerdov D.N.
Systematization of the application of polymer composite materials in the design of bridge structures 419

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Vasilyeva M.E., Volkova E.M., Guryanov A.V.
Providing financial and economic security of projects for the construction of transport hubs 435

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

https://doi.org/10.17816/transsyst633466

© Р.Г. Ахтямов
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Цель. Разработка подхода по повышению устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов.

Методы. На основе оценки динамики опасных природных процессов, в том числе, на примере экзогенных геологических процессов, которые могут послужить причиной нарушении в функционировании транспортной сети, а также структуры оценки устойчивости и восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска сформулированы стратегии восстановления транспортной сети.

Результаты. На основе сформулированных стратегий возможно сетевое моделирование топологии транспортной сети. Для моделирования транспортная сеть может быть представлена в виде неориентированного взвешенного графа с набором узлов и ребер. Предложенная модель позволяет определить наиболее эффективную стратегию с точки зрения быстрого восстановления связности транспортной сети, на основе определения последовательности восстановления участков дорог с учетом времени восстановления. Ожидается, что эффективность процесса восстановления поврежденных участков транспортной сети будет меняться в зависимости от доли восстановленной сети, снижаясь при увеличении доли. В этой связи целесообразно оценить ту долю восстановления транспортной сети, которая будет необходима для выполнения задач формирований РСЧС в условиях проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на конкретной территории.

Заключение. Анализ и оценка альтернативных решений восстановления устойчивости транспортных сетей основывается на комплексности решаемых задач при реализации факторов климатического риска, таких как опасные природные процессы. В ряде случаев, для решения задач РСЧС не требуется полное восстановление транспортной сети, в отличие от задач, решаемых транспортной отраслью. Задача данной работы заключалась в разработке основы для оценки стратегий восстановления транспортных сетей, с выявлением особенностей каждой из рассмотренных стратегий в условиях неопределенности, а также повышение эксплуатационной устойчивости. Предложенный подход характеризуется гибкостью, что позволяет лицам, принимающим решения, оценить различные приоритеты, возникающие при развитии конкретной природной чрезвычайной ситуации на определенной территории (например, среднее время восстановления, эффективность процесса восстановления, величина неопределенности) при выборе наиболее желательной стратегии. Предполагается, что среднее время восстановления не имеет существенного различия между стратегиями, при полном восстановлении транспортной сети. Однако, при частичном восстановлении сети, необходимой для решения задач РСЧС, среднее время восстановления зависит от выбранной стратегии.

Ключевые слова: транспортная сеть; устойчивость; восстановление; граф; чрезвычайные ситуации; стратегия.

Как цитировать:
Ахтямов Р.Г. Повышение устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 287–299. doi: 10.17816/transsyst633466

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS
Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© R.G. Akhtyamov
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

INCREASING RESILIENCE AND SELECTION OF A STRATEGY FOR RESTORING TRANSPORT NETWORKS IN EXTREME NATURAL PROCESSES

Aim. The development of an approach to increasing resilience by selecting strategies for restoring transport networks affected by extreme natural processes.

Methods. This study evaluates the dynamics of extreme natural processes, specifically exogenous geological processes that can that can disrupt transport networks. It includes as framework for assessing the sustainability and restoration of transport networks under climate risk factors. Strategies for restoring the transport network were formulated.

Results. The formulated strategies enable network modeling of transport network topology, which can be represented as an undirected weighted graph with a set of nodes and edges. The proposed model allows determining the most effective strategy for quickly restoring the connectivity of the transport network by determining the optimal sequence of restoration for repairing road sections, considering restoration time. The efficiency of restoring damaged sections of the transport network is expected to decrease as the share of the restored network increases. Therefore, it is crucial to estimate the necessary extend of network restoration to perform the necessary extent of network restoration to support emergency and urgent tasks by RSChS formations in specific areas.

Conclusion. The analysis and assessment of alternative solutions for restoring the sustainability of transport networks considers the complexity of tasks under climate risk factors, such as extreme natural processes. In some cases, the RSChS problems do not require complete network restoration, unlike the tasks solved by the transport industry. This work aims to develop a framework for assessing restoration strategies, identifying the features of each of the considered strategies under uncertainty, and increasing operational sustainability. The proposed approach is flexible, allowing decision makers to assess various priorities during a specific natural emergency in a certain area, such as average recovery time, process efficiency, and uncertainty levels, when choosing the most desirable strategy. It is assumed that the average recovery time does not differ significantly among strategies for full network restoration. However, for partial restorations necessary for RSChS tasks, the average restoration time depends on the chosen strategy.

Keywords: transport network; sustainability; restoration; graph; emergency situations; strategy.

To cite this article:
Akhtyamov RG. Increasing resilience and selection of a strategy for restoring transport networks in extreme natural processes. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):287–299. doi: 10.17816/transsyst633466

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «устойчивость» используется в ряде дисциплин, и в общем случае может рассматриваться как элемент оценки риска. Под устойчивостью транспортной сети понимается способность к восстановлению, позволяющая сети полностью или частично функционировать после сбоев, вызванных природными или антропогенными воздействиями, возникающими в результате физических угроз.

Транспортные сети являются основой критически важной инфраструктуры, поскольку они обеспечивают связность систем в режиме повседневной деятельности, а также возможность доставки сил и средств в зону проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в режиме чрезвычайной ситуации. Таким образом, повышение устойчивости на основе анализа сложности процесса восстановления имеют решающее значение для транспортных сетей.

В условиях меняющегося климата, реализация факторов климатического риска повышает частоту природных стихийных явлений, которые могут стать источником чрезвычайной ситуации техногенного характера, в том числе на объектах транспортной сети. Восстановление транспортных сетей после воздействия поражающих факторов природных чрезвычайных ситуаций анализируется, и предлагаются решения с помощью алгоритмов оптимизации [1, 2]. Формулировка задач оптимизации учитывает неопределенности при распределении ресурсов и способствует пониманию комплексности задачи повышения устойчивости объектов транспортной инфраструктуры. Так, в ряде случаев, для решения задач в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций может быть реализовано краткосрочное частичное восстановление транспортной сети (автодорожной и/или железнодорожной). В таких случаях формулировка задачи оптимизации должна отличаться от достижения цели восстановления полной эксплуатационной мощности. В частности, базовая функциональность транспортной инфраструктуры не может быть достигнута в условиях масштабных разрушений вследствие опасных геологических процессов, таких как оползни и землетрясения в сжатые сроки.

Помимо подходов, связанных с оптимизацией, для оценки устойчивости транспортной инфраструктуры используется теория графов [3]. Существует метод, изложенный в работе [4], по оценке устойчивости топологии транспортной сети, который объединяет теорию графов с методологией стресс-тестирования. В работе [5] приведена

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

вероятностная модель для исследования потерь функциональности объектов инфраструктуры в результате реализации одиночных или множественных природных или техногенных опасностей на основе анализа сценариев восстановления участков дороги, с выделением приоритетов и потребности в восстановлении. Также существуют методы оптимизации восстановления участков дороги, основанные на минимизации эксплуатационных затрат [6].

Целью данной работы является разработка подхода по повышению устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С 1960 года в мире зарегистрировано более 11 000 чрезвычайных ситуаций, вызванных природными стихийными явлениями, причем число катастроф неуклонно возрастает [7]. В последние десятилетия увеличение экстремальных событий привело к более частым, интенсивным и разрушительным и природным и техногенным чрезвычайным ситуациям. Изменение климата связано с увеличением частоты и тяжести экстремальных погодных явлений.

В соответствии с [8] к середине XXI в. на территории России преимущественно ожидается увеличение суммы осадков в теплый сезон. Важным фактором является сопутствующий рост суточной интенсивности осадков. Рост количества и интенсивности осадков в теплое время года увеличит риски возникновения опасных последствий, связанных с потерей устойчивости склонов – оползней. Такие риски особенно возрастают в случаях, когда сухие периоды чередуются с периодами интенсивных ливней. На Рис. 1 приведено изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 года.

Как видно из Рис. 1, рост количества оползней в мире с 1900 по 2019 года описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,96. При этом с 2020 по 2022 год произошло 48 оползней, что составляет 26% от количества оползней, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

В некоторых случаях угрожающим фактором при оценке климатического риска может служить не само опасное явление, а создаваемое им природное или техногенное событие (или последовательность событий), которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной реципиент. Кроме того, к росту ущерба приводят не только погодно-климатические факторы,

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

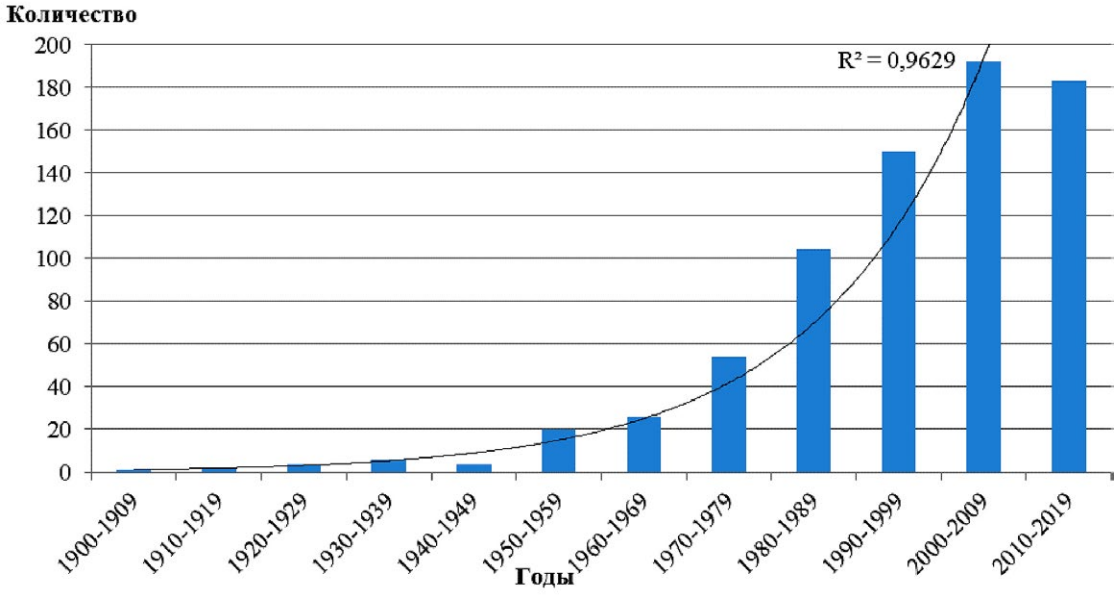


Рис. 1. Изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 гг.

Fig. 1. Change in the number of landslides in the world from 1900 to 2019

но и возрастающая уязвимость инфраструктуры. Это объясняется высокой степенью ее износа, отклонением от строительных норм и правил, освоением территорий, находящихся в зоне повышенного климатического риска [9].

Оценка устойчивости транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска включает следующие этапы: сбор исходных данных; определение стратегий восстановления транспортной сети; определение показателей эффективности для оценки связности транспортной сети; моделирование топологии транспортной сети и неопределенности времени восстановления; оценка показателей эффективности для сравнения стратегий восстановления транспортной сети с точки зрения устойчивости и времени восстановления (Рис. 2).

Определение стратегий восстановления транспортной сети (Рис. 2) выполнено на примере нарушения транспортной работы вследствие реализации такого фактора климатического риска, как экзогенный геологический процесс – оползень. Стратегия восстановления транспортной сети зависят от наличия ресурсов и определении приоритетов в восстановлении функциональности транспортной сети. При определении последовательности восстановления транспортной сети необходимо также учитывать ряд факторов, такие как доступность ресурсов, грузооборот участка транспортной сети, время, необходимое

Received: 19.06.2024
Поступил: 19.06.2024
Revised: 07.07.2024
Одобрена: 07.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

Рис. 2. Структура оценки устойчивости и возможности восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска

Fig. 2. Structure of assessment of sustainability and possibility of restoration of transport networks in conditions of realization of climate risk factors

для расчистки дороги от завала, вследствие оползня и восстановления движения [10].

На основе предложенной структуры оценки устойчивости и восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска сформулированы следующие стратегии:

Стратегия 1 – восстановление транспортной сети на основе критерия «доступность ресурсов» предполагает, что формирования Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) имеют доступ к поврежденному участку транспортной сети из ближайшего крупного населенного пункта, на территории которого имеются необходимые ресурсы для восстановления движения. Таким образом, реализация данной стратегии достигается путем поиска кратчайшего доступного маршрута для формирований РСЧС. Реализация подобного подхода с учетом оптимизации проведена в работе [11], с учетом максимизации доступности крупных источников ресурсов в условиях природных или техногенных чрезвычайных ситуаций.

Стратегия 2 – восстановление транспортной сети на основе двух критериев: «доступность ресурсов» и «грузооборот участка транспортной сети». Так как грузооборот участков транспортной сети имеет существенные отличия, то предполагается, что восстановление наиболее грузонапряженных участков, имеет приоритет с точки зрения пропускной способности, в том числе для доставки сил и средств РСЧС в зону

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

чрезвычайной ситуации. Таким образом, участки транспортной сети, заблокированные оползнем, восстанавливаются исходя из ранжирования показателей грузооборота участка транспортной сети и доступности ресурсов.

Стратегия 3 – восстановление дорог с учетом критериев: «доступность ресурсов» и «время восстановления». Время, необходимое для восстановления каждого участка транспортной сети определяется объемом работ по удалению грунта и устранению последствий схода оползня. Таким образом, приоритет участка восстановления транспортной сети определяется наименьшим временем на расчистку дороги и восстановление движения с учетом доступности ресурсов, например, из ближайшего крупного населенного пункта. Аналогичная стратегия восстановления движения на участке транспортной сети рассмотрена в работе [12] в контексте восстановления доступности железнодорожного сообщения после землетрясения в Японии в 1995 году.

Стратегия 4 – динамическое моделирование последовательности восстановления участков транспортной сети на основе критерия «время восстановления». В качестве приоритета определено время, необходимое для восстановления движения на поврежденном участке транспортной сети с последующим ранжированием участков в порядке возрастания времени. В отличие от Стратегии 3, не рассматривается условие близости и доступности ресурсов, с точки зрения анализа изменений в проведении работ по восстановлению участков транспортной сети в условиях неопределенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе выбранной стратегии проводится сетевое моделирование с учетом топологии транспортной сети [13]. При моделировании транспортная сеть представляется в виде неориентированного взвешенного графа с набором узлов и ребер. Далее поврежденная транспортная сеть представляется в виде графа путем удаления поврежденных участков (ребер) из базовой транспортной сети. Затем поврежденные участки транспортной сети поочередно добавляются в граф с расчетом связности сети. Данная процедура повторяется до восстановления первоначального вида сети. Последовательность добавления участков определяется в соответствии с требованиями выбранной стратегии восстановления.

Оценка неопределенности может быть проведена с использованием метода Монте-Карло, так как данный метод позволяет использовать

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

вероятностные модели на основе анализа распределения вероятности для проверки гипотезы (выбранного сценария) путем случайного выбора переменных посредством повторной выборки. Моделирование Монте-Карло используется для анализа последствий стихийных бедствий, а также для генерации опасных событий при исследовании критичности транспортных сетей [14] и оценки разливов нефти [15]. Для цели данной работы, моделирование по методу Монте-Карло позволяет оценить неопределенность во времени восстановления для каждого, поврежденного участки транспортной сети.

Кроме характеристики каждой стратегии по восстановлению общей связности транспортной сети необходимо оценить «скорость восстановления». В контексте восстановления устойчивости «скорость восстановления» рассмотрена в работах [16-18]. Минимальное и максимальное время восстановления поврежденных участков транспортной сети определяется следующими факторами: объем завалов, образовавшихся вследствие оползня; характеристика территории расположения анализируемого участка транспортной сети; характеристика сил и средств РСЧС, расположенных на анализируемой территории. Эффективность каждой стратегии может оцениваться следующими факторами: время полного восстановления участка транспортной сети; доля восстановленной транспортной сети, необходимая для решения задач РСЧС; величина неопределенности.

Время полного восстановления участка транспортной сети может быть определено при помощи метода Монте-Карло. При этом модальное значение времени полного восстановления участка транспортной сети может являться значимым показателем в случае ограниченности ресурсов и необходимости выбора тех участков транспортной сети, восстановление которых является первостепенным.

Доля восстановленной транспортной сети, необходимая для решения задач РСЧС, может определяться посредством анализа функций распределения в каждом квартиле процесса восстановления. Для этого, процесс восстановления участков транспортной сети может быть разделен на доли восстановления 25%, 50%, 75%, 100%. Далее, для 25% восстановления всех поврежденных участков транспортной сети определяются среднее, максимальное и минимальное время восстановления для каждого участка. Критерием эффективности стратегии является минимальное среднее время восстановления с учетом размаха вариации. Таким образом, стратегия является наиболее эффективной, если

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

среднее время восстановления с учетом размаха вариации при каждой доле восстановления меньше, чем у других стратегий.

Оценка неопределенности может быть проведена на основе определения минимального и максимального времени восстановления с учетом доли восстановления.

Предложенная модель позволяет определить наиболее эффективную стратегию с точки зрения быстрого восстановления связности всей транспортной сети, на основе построения последовательности восстановления участков дорог с учетом времени восстановления.

Так как стратегии 1 и 2 ориентированы на доступность ресурсов для восстановления и грузооборот анализируемых участков, то среднее время восстановления участков транспортной сети будет выше, чем в стратегиях 3 и 4. Однако в случае, если приоритетом является полное восстановление транспортного сообщения в условиях доступа к ресурсам крупных населённых пунктов стратегии 1 и 2 являются предпочтительными.

Стратегии 3 и 4 опирающиеся на доступность ресурсов и ориентирующиеся на сокращение времени восстановления участков транспортной сети, например, в целях скорейшей эвакуации пострадавшего населения и доставки в зону чрезвычайной ситуации предметов первой необходимости, особенно в условиях возможности комбинирования различных транспортных сетей, позволяют получить минимальное среднее время восстановления.

Ожидается, что эффективность процесса восстановления поврежденных участков транспортной сети будет меняться в зависимости от доли восстановленной сети, снижаясь при увеличении доли. В этой связи целесообразно оценить ту долю восстановления транспортной сети, которая будет необходима для выполнения задач формирований РСЧС в условиях проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на конкретной территории. Таким образом, стратегии восстановления транспортной сети могут быть сравнены для учета особенностей различных стратегий, что позволяет повысить эксплуатационную устойчивость транспортной сети.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и оценка альтернативных решений восстановления транспортных сетей основывается на комплексности решаемых задач при реализации факторов климатического риска, таких как опасные природные процессы. В ряде случаев, для решения задач РСЧС не требуется

Received: 19.06.2024 Revised: 07.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 19.06.2024 Одобрена: 07.07.2024 Принята: 30.09.2024

полное восстановление транспортных сетей, в отличие от задач, решаемых транспортной отраслью. Задача данной работы заключалась в разработке основы для оценки стратегий восстановления транспортных сетей, с выявлением особенностей каждой из рассмотренных стратегий в условиях неопределенности, а также в повышении эксплуатационной устойчивости. Предложенный подход характеризуется гибкостью, что позволяет лицам, принимающим решения, оценить различные приоритеты, возникающие при развитии конкретной природной чрезвычайной ситуации на определенной территории (например, среднее время восстановления, эффективность процесса восстановления, величина неопределенности) при выборе наиболее желательной стратегии. Показано, что среднее время восстановления не имеет существенного различия между стратегиями, при полном восстановлении транспортной сети. Однако, при частичном восстановлении сети, необходимого для решения задач РСЧС среднее время восстановления зависит от выбранной стратегии.

Таким образом, выбор последовательности участков транспортной сети подлежащих восстановлению можно выделить в качестве оптимальной стратегии в условиях ограниченного доступа к ресурсам. Тем не менее, реализация данной стратегии требует оценки масштабов природной чрезвычайной ситуации, нарушившей связность транспортной сети, а также времени проведения работ по восстановлению.

В данной работе сформулированы и проанализированы четыре стратегии повышения устойчивости транспортной сети, однако количество стратегий может быть расширено в зависимости от топологии сети, местных условий, решаемых лицами, принимающими решения задач. В целом, предложенная методология позволяет оценить различные стратегии восстановления, а также повысить устойчивость транспортных сетей.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.
The authors state that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tuzun A.D., Ozdamar L. A mathematical model for post-disaster road restoration: enabling accessibility and evacuation // Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev. 2014. Vol. 61. P. 56–67. doi: 10.1016/j.tre.2013.10.009
2. Çelik M., Ergun Ö., Keskinocak P. The post-disaster debris clearance problem under incomplete information // Oper. Res. 2015. Vol. 63. P. 65–85. doi: 10.1287/opre.2014.1342

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

3. Schintler L.A., Kulkarni R., Gorman S., Stough R. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks // Netw. Spat. Econ. 2007. Vol. 7. P. 301–313. doi: 10.1007/s11067-007-9029-4
4. Aydin N.Y., Duzgun H.S., Wenzel F., Heinimann H.R. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards // Nat. Hazards. 2018. Vol. 91. P. 37–68. doi: 10.1007/s11069-017-3112z
5. Shangyao Y., Chu J.C., Yu-Lin S. Optimal scheduling for highway emergency repairs under large-scale supply-demand perturbations // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2014. Vol. 15. P. 2378–2393 doi: 10.1109/TITS.2014.2313628
6. Yan S., Lin C.K., Chen S.Y. Optimal scheduling of logistical support for an emergency roadway repair work schedule // Eng. Optim. 2012. Vol. 44. P. 1035–1055. doi: 10.1080/0305215X.2011.628389
7. CRED/UNDRR. The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective; Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED): Brussels, Belgium. 2015. Vol. 255. doi: 10.1016/b978-0-12-817465-4.00015-7
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2021:3–32, doi:10.1017/9781009157896.001
9. Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Assessment of the contribution and measures to reduce the impact of the railway industry on the development of global warming // E3S Web of Conferences. TT21C-2023. 2023. P. 01001. doi: 10.1051/e3sconf/202338301001
10. Aydin N.Y., Duzgun H., Heinimann H.R., Wenzel F. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2018. Vol. 31. P. 832–843. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.07.022
11. Maya D.P., Sörensen K. A GRASP metaheuristic to improve accessibility after a disaster // R Spectr. 2011. Vol. 33. P. 525–542. doi: 10.1007/s00291-011-0247-2
12. Chang S.E. Transportation planning for disasters: an accessibility approach // Environ. Plan. 2003. Vol. 35. P. 1051—1072. doi: 10.1068/a35195
13. Titova T.S., Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport // Modern Transportation Systems and Technologies. 2023. Vol. 9. P. 5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18
14. Yang S., Hu F., Thompson R.G., et al. Criticality ranking for components of a transportation network at risk from tropical cyclones // Int. J. Disaster Risk Reduct. 2018. Vol. 28. P. 43–55. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.017
15. Nelson J.R., Grubesic T.H. A repeated sampling method for oil spill impact uncertainty and interpolation // Int. J. Disaster Risk Reduct. 2017. Vol. 22. P. 420–430. doi: 10.1016/j.ijdrr.2017.01.014
16. D'Lima M., Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground // Transp. Res. Part A: Policy Pract. 2015. Vol. 81. P. 35–46. doi: 10.1016/j.tra.2015.05.017

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

17. Padgett J.E., Barbosa A.R., Chen S., Cox D. Multiple-Hazard fragility and restoration models of highway bridges for regional risk and resilience assessment in the United States: state-of-the-art review // J. Struct. Eng. 2017. Vol. 143. P. 04016188. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001672
18. Baroud H., Ramirez-Marquez J.E., Barker K., Rocco C.M. Stochastic measures of network resilience: applications to waterway commodity flows // Risk Anal. 2014. Vol. 34. P. 1317–1335. doi: 10.1111/risa.12175

REFERENCES

1. Tuzun AD, Ozdamar L. A mathematical model for post-disaster road restoration: enabling accessibility and evacuation. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 2014;61:56–67. doi: 10.1016/j.tre.2013.10.009
2. Çelik M, Ergun Ö, Keskinocak P. The post-disaster debris clearance problem under incomplete information. *Oper. Res.* 2015;63:65–85. doi: 10.1287/opre.2014.1342
3. Schintler LA, Kulkarni R, Gorman S, Stough R. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks. *Netw. Spat. Econ.* 2007;7:301–313. doi: 10.1007/s11067-007-9029-4
4. Aydin NY, Duzgun HS, Wenzel F, Heinimann HR. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards. *Nat. Hazards.* 2018;91:37–68. doi: 10.1007/s11069-017-3112z
5. Shangyao Y, Chu JC, Yu-Lin S. Optimal scheduling for highway emergency repairs under large-scale supply-demand perturbations. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2014;15:2378–2393. doi: 10.1109/TITS.2014.2313628
6. Yan S, Lin CK, Chen SY. Optimal scheduling of logistical support for an emergency roadway repair work schedule. *Eng. Optim.* 2012;44:1035–1055. doi: 10.1080/0305215X.2011.628389
7. CRED/UNDRR. The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective; Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED): Brussels, Belgium. 2015:255. doi: 10.1016/b978-0-12-817465-4.00015-7
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press,. 2021:3–32. doi:10.1017/9781009157896.001
9. Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Assessment of the contribution and measures to reduce the impact of the railway industry on the development of global warming. *E3S Web of Conferences.* TT21C-2023. 2023:01001. doi: 10.1051/e3sconf/202338301001
10. Aydin NY, Duzgun H, Heinimann HR, Wenzel F. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks. *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2018;31:832–843. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.07.022
11. Maya DP, Sörensen K. A GRASP metaheuristic to improve accessibility after a disaster. *R Spectr.* 2011;33:525–542. doi: 10.1007/s00291-011-0247-2

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

12. Chang SE. Transportation planning for disasters: an accessibility approach. *Environ. Plan.* 2003;35:1051–1072. doi: 10.1068/a35195
13. Titova TS, Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9:5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18
14. Yang S, Hu F, Thompson RG, et al. Criticality ranking for components of a transportation network at risk from tropical cyclones. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2018;28:43–55. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.017
15. Nelson JR, Grubesic TH. A repeated sampling method for oil spill impact uncertainty and interpolation. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2017;22:420–430. doi: 10.1016/j.ijdrr.2017.01.014
16. D'Lima M, Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2015;81:35–46. doi: 10.1016/j.tra.2015.05.017
17. Padgett JE, Barbosa AR, Chen S, Cox D. Multiple-Hazard fragility and restoration models of highway bridges for regional risk and resilience assessment in the United States: state-of-the-art review. *J. Struct. Eng.* 2017;143:04016188. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001672
18. Baroud H, Ramirez-Marquez JE, Barker K, Rocco CM. Stochastic measures of network resilience: applications to waterway commodity flows. *Risk Anal.* 2014;34:1317–1335. doi: 10.1111/risa.12175

Сведения об авторе:
Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Information about the author:
Rasul Akhtyamov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Received: 19.06.2024 **Revised: 07.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 19.06.2024 **Одобрена: 07.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИИ ПРОЕКТЫ
Направление –Электротехнические комплексы и системы

https://doi.org/10.17816/transsyst634812

© В.Д. Быльцева, М.Ю. Изварин, К.К. Ким
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ХОДА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Система автономного хода (САХ) в городском электрическом транспорте играет важную роль, так как она обеспечивает движение подвижного состава в случае «потери» доступа к контактной сети из-за аварийных ситуаций или ремонтных работ. Благодаря САХ, транспортные средства могут продолжать свое движение с установленными скоростями и обеспечивать перевозку пассажиров с высоким уровнем комфорта и безопасности.

Автономный ход позволяет сохранить мобильность транспортного средства и обеспечивает его необходимую доступность для пассажиров даже при отсутствии контактной сети. САХ повышает надежность и эффективность работы городского электрического транспорта, обеспечивая более стабильное функционирование системы перевозок в городе.

Целью данной статьи является обзор транспортных систем городского электрического транспорта и потенциала их развития за счет внедрения системы автономного хода на подвижном составе.

Ключевые слова: система автономного хода; городской электрический транспорт; аккумуляторная батарея; суперконденсатор; троллейбус; трамвай.

Как цитировать:
Быльцева В.Д., Изварин М.Ю., Ким К.К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 300–319. doi: 10.17816/transsyst634812

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS
Subject – Electrotechnical complexes and systems

© V.D. Byltseva, M.Yu. Izvarin, K.K. Kim
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

AUTONOMOUSRUNNINGSYSTEMS OF URBANELECTRICTRANSPORT

The autonomous running system (ARS) is crucial for urban electric transport, ensuring the movement of electric rolling stock even when access to the contact network is lost owing to emergencies or repair work. Thanks to the ARS, the vehicles can maintain their set speeds, providing passengers with comfortable and safe movements.

The autonomous running allows vehicles to remain mobile and accessible to passengers, even without power supply from the contact network. ARS increases the reliability and efficiency of urban electric transport, ensuring a more stable operation of the transportation system in the city.

This article aims to review the transport systems of urban electric transport and assess their development potential by integrating an ARS into the rolling stock.

Keywords: autonomous running system; urban electric transport; rechargeable battery; supercapacitor; trolleybus; tram.

To cite this article:
Byltseva VD, Izvarin MYu, Kim KK. Systems of autonomous running of urban electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):300–319. doi: 10.17816/transsyst634812

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Использование системы автономного хода (САХ) на городском электрическом транспорте имеет множество преимуществ:

1. открытие новых и изменение старых маршрутов без строительства тяговых подстанций и контактной сети, т.е. повышение гибкости маршрутной сети из-за возможности бесконтактного движения транспортного средства;
2. снижение расхода электроэнергии, потребляемой подвижным составом: использование накопителей электрической энергии, таких как суперконденсаторы и/или аккумуляторные батареи, помогает оптимизировать потребление энергии и делает городской электрический транспорт более энергоэффективным;
3. отсутствие контактной сети оказывает положительное влияние на облик городов;
4. возможность применения рекуперации с отдачей энергии в накопитель. В системе электроснабжения постоянного тока классическая рекуперация возможна только при наличии потребителя в сети. При отсутствии потребителя, каковым обычно является подвижной состав в режиме тяги, рекуперация становится невозможной. Наличие накопителя-потребителя полностью решает эту проблему.

Таким образом, использование САХ на подвижном составе городского электрического транспорта представляет собой инновационное решение, которое имеет множество практических преимуществ и способствует развитию устойчивой и современной городской инфраструктуры. Различным аспектам использования САХ на городском электротранспорте и посвящена настоящая работа.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТУАХ В ГОРОДАХ С СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТРОЛЛЕЙБУСНОЙ СИСТЕМОЙ

Замена либо дополнение парка традиционных троллейбусов с питанием от контактной сети электробусами с динамической зарядкой (называемыми также троллейбусами с увеличенным автономным ходом – ТУАХ) – очередной шаг в сторону повышения надежности и экономичности городского безрельсового электротранспорта. Использование ТУАХ улучшит экологическую обстановку в городах, так как часть пассажирооборота перейдет с автобусов на электротранспорт, что позволит сократить выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду и уменьшить зависимость от нефтепродуктов.

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

Использование существующей троллейбусной инфраструктуры для заряда накопителей энергии электробусов сэкономит средства на строительство новых зарядных станций, необходимых для электробусов иных типов. Однако, переход даже на такие электробусы требует значительных инвестиций в обновление парка электротранспорта и инфраструктуры.

Необходимо учитывать технические особенности и безопасность систем заряда подвижного состава, но, в целом, переход на электробусы с динамической зарядкой – важный шаг в направлении устойчивого развития городского электротранспорта. Электробус с динамической зарядкой представляет собой троллейбус, на котором кроме традиционного для такого транспортного средства электрооборудования (токоприемники, тяговый двигатель, система управления на основе электронного преобразователя) установлен еще и накопитель электроэнергии – тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ) или конденсаторы большой емкости. Это позволяет ему осуществлять движение как на обесточенных участках, так и на участках, вообще не имеющих контактной сети. При этом появляется возможность развивать маршрутную сеть без расширения системы электроснабжения.

В соответствие с современным подходом к классификации, ТУАХ является гибридным транспортным средством, несмотря на то, что он имеет одну силовую установку, так как она может получать питание как от контактной сети, так и от ТАБ, как и контактно-аккумуляторные электровозы железных дорог и метрополитенов [1].

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ХОДА

В СССР в 1930-х –1940-х гг. эксплуатировались троллейбусы ЯТБ-3 с автономным ходом, где в качестве накопителей применялись традиционные аккумуляторные батареи с жидким электролитом. Однако, такая система имела небольшой запас автономного хода – до 8 км, при уменьшенной мощности и скорости движения. Батарея имела большую массу и не могла принимать энергию рекуперации. В дальнейшем такая система ограниченно применялась на грузовых троллейбусах.

Использование накопителей новых типов (литий-ионных аккумуляторных батарей и суперконденсаторов) в САХ увеличивает запас автономного хода подвижного состава, при обеспечении питания тягового электродвигателя номинальной мощностью. Литий-ионные

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

аккумуляторные батареи имеют несколько разновидностей с различной плотностью запасаемой энергии, скоростью заряда, массогабаритными показателями и ценой. Выбор того или иного накопителя энергии зависит от предполагаемых условий эксплуатации электробуса. Классификация САХ с АКБ представлена на Рис. 1 [2].

Существует три варианта режима заряда аккумуляторных батарей:

- медленный тип заряда, когда подвижной состав заряжается ночью в парке, а днем работает без использования контактной сети. Преимущество такой системы – низкая стоимость электроэнергии, отпускаемой по «ночному» тарифу. В указанных системах используются литий-ионные аккумуляторы с максимальной плотностью энергии и небольшим зарядным током;
- быстрый тип заряда, когда литий-титанатные или другие, допускающие быстрый заряд аккумуляторы транспортного средства заряжаются днем в конечных пунктах маршрута, на зарядных станциях большой мощности;
- динамический тип заряда; в этом случае заряд ТАБ осуществляется во время движения или стоянки с поднятыми токоприемниками. В таких системах могут применяться не только литий-титанатные, но и литий-железофосфатные аккумуляторы.

Выше упоминалось, что основное назначение ТУАХ (электробусов IMC) – это расширение маршрутной сети электротранспорта без реконструкции системы электроснабжения. Однако, наличие ТАБ позволяет реализовать и другие полезные функции.

В [2] отмечено, что изменения напряжения контактной сети, обусловленные потреблением тока тяговым преобразователем (ТП), напряжения тяговой аккумуляторной батареи и скорости при движении троллейбуса, играют ключевую роль в эффективном функционировании ТУАХ. Эти параметры важны для оптимизации работы системы и обеспечения непрерывной подачи энергии.

При этом тормозные резисторы используются лишь для перевода избыточной энергии, вырабатываемой ТЭД в режиме торможения, в тепловую при условии, что в контактной сети отсутствует потребитель, а допустимый зарядный ток меньше тока на входе инвертора, либо ТАБ полностью заряжена. Указанное обстоятельство обеспечивает наиболее экономичную работу системы электроснабжения и подвижного состава

Графики изменения напряжения контактной сети КС, потребляемого тока, напряжения ТАБ и скорости при движении ТУАХ при питании

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

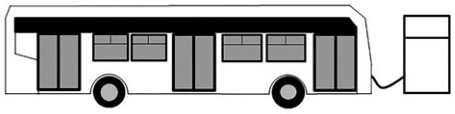
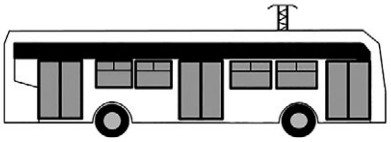
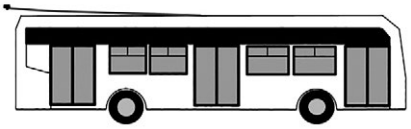
Электробусы с «ночным» зарядом (Over Night Charging, ONC) в парке от промышленной сети 380В и запасом хода на всю смену (200 км) Используются литий-ионные ТАБ с наибольшей плотностью энергии	
Электробусы с подзарядом на маршруте от зарядных станций большой мощности (Opportunity Charging, OPC). В качестве источника может использоваться промышленная сеть 380 В, сеть постоянного тока 550 В или распределительная сеть 10 кВ. Запас хода от 30 до 50 км используются литий-титанатные ТАБ, имеющие меньшую энергоемкость, но допускающие большой зарядный ток. Токоприемник не предназначен для токосъема в движении	
Электробусы с динамической зарядкой, или зарядкой в движении (In-Motion-Charging, IMC). Эти же электробусы известны как ТУАХ. Запас хода в автономном режиме до 30 км. Используются литий-железофосфатные или литий-титанатные ТАБ. Токоприемники штангового типа, токосъем в движении и на стоянке с ограничением по току,	

Рис. 1. Классификация подвижного состава с САХ на основе аккумуляторных батарей

Fig. 1. Classification of ACR with accumulator batteries

от КС и ТАБ представлены на Рис. 2. Как видно, для контактной сети ТУАХ по своему влиянию практически не отличается от обычного ЭПС, однако после режима «автономный ход» увеличивается потребление тока, обусловленное необходимостью заряда ТАБ. Графики данных процессов описаны в [2] по материалам ГУП «Горэлектротранс».

В [2] определено среднее значение тока, потребляемого троллейбусом с автономным ходом при движении в режиме тяги при заряде ТАБ, которое можно вычислить согласно формуле:

$$I_{ТягаСред} = \frac{1}{T}\int_{0|\ когда\ I_{КС}(t)>0}^{T} I_{КС}(t)dt \approx 70A$$

Таким образом, в [2] выявлено негативное влияние ТУАХ на систему электроснабжения, выражающееся, прежде всего, в неравномерной

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

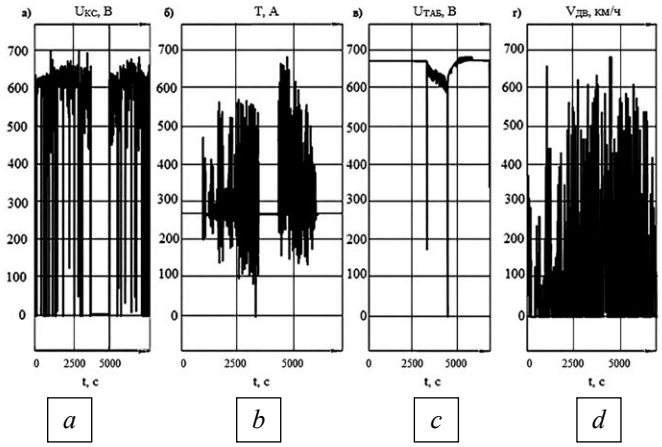


Рис. 2. Графики изменения напряжения КС (*a*); тока тягового преобразователя (*b*); напряжения тяговой АБ (*c*); скорости движения (*d*) ТУАХ при питании от контактной сети (левая и правая части графика и ТАБ (средняя часть) [2]

Fig. 2. Graphs of changes of the voltage on the CS (*a*); the current of the traction converter (*b*); the voltage of the traction motor (*c*); the speed of movement (*d*) of the TAB when powered from the contact network (left and right parts of the graph and TAB (middle part) [2]

по времени нагрузке контактной сети и завышении напряжения и предложен вариант решения данной проблемы.

Существуют разработки и проекты более совершенных видов ТУАХ, которые позволяют эффективнее управлять потреблением энергии. Например, использование части энергии из КС и части от ТАБ в режиме тяги может помочь балансировать нагрузку на контактную сеть.

В режиме выбега или стоянки всю потребляемую энергию можно направлять на заряд ТАБ, а в режиме рекуперации – добавлять к ним энергию, восстановленную при рекуперативном торможении. Это все способствует повышению эффективности и уменьшению негативного воздействия на имеющуюся инфраструктуру.

Такой алгоритм позволит выровнять нагрузку на КС и снизить потери в ней. Один из таких вариантов рассмотрен в [2]. Однако, он требует включения в схему дополнительного зарядного преобразователя высокой мощности. Мощность такого преобразователя должна быть примерно в 2 раза выше мощности ТЭД, а неизбежное двойное преобразование энергии снизит общий КПД системы (подобная энергетическая цепь применяется в преобразователях с промежуточным звеном постоянного тока).

При этом, применение схемы с независимым питанием ТАБ и ТЭД не уменьшит КПД, обеспечив при этом алгоритм выравнивания нагрузки

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

на сеть, не прибегая к ТАБ, как к постоянному источнику энергии (в режиме тяги – источник, в режиме выбега и торможения – потребитель (накопитель).

Использование алгоритма с распределением нагрузки между ТАБ и КС позволяет сократить количество бросков тока в системе электроснабжения при пуске и снизить максимальные значения токов, потребляемых из КС, сделать нагрузку на систему электроснабжения более равномерной. Это позволит в будущем увеличить расстояние между подстанциями, что в совокупности с автономным ходом сделает систему электроснабжения дешевле. Можно даже осуществить режим аварийного питания КС, от которой питаются не только ТУАХ, но и обычные троллейбусы, например, вовремя, так называемых «блэкаутов», аварийных отключений на ЛЭП системы внешнего электроснабжения, что повысит надежность троллейбусного транспорта в целом.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ХОДА БЕЗРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Современные и перспективные аккумуляторные батареи высокой емкости, применяемые для оборудования ТУАХ, позволяют значительно расширить полигон эксплуатации безрельсового электротранспорта.

Однако, они требуют принципиально нового, комплексного подхода. Последний заключается в том, что внедрение не должно заканчиваться выходом на обычные и удлиненные маршруты ТУАХ. Вся система нового городского электротранспорта, включая зарядные мощности, оборудование для ремонта и обслуживания в парках, установка систем постановки штанг на КС должна рассчитываться, и внедрятся одновременно или поэтапно, как новая транспортная система.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ РЕЛЬСОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С АВТОНОМНЫМ ХОДОМ

Одним из видов городского электротранспорта является метрополитен. Одним из основных отличий от наземного электротранспорта является то, что питание контактной сети осуществляется постоянным током с номинальным значением напряжения 750 В (на фидере подстанции 825 В). В ночное время в тоннелях производятся работы (в частности, мойка водой), поэтому в целях безопасности с контактного рельса снимают напряжение. Однако, при этом необходимо перемещать служебный

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

самоходный подвижной состав, грузы и персонал по путям, выполнять маневровую работу на путях депо, переставлять неисправные вагоны.

С этой целью в метрополитене используются контактно-аккумуляторные электровозы, которые фактически представляют собой ЭПС с автономным ходом с мощной ТАБ, состоящий из 360 последовательно включенных аккумуляторов ТПЖН-550. Общее напряжение батареи составляет 400 В, что равно примерно половине напряжения контактного рельса. В начале 1980-х гг. кафедрой «Электрическая тяга» ЛИИЖТа (ПГУПС) совместно с ПКТБ Ленинградского метрополитена был создан контакно-аккумуляторный электровоз Эка-07Т с рекуперативным торможением, предназначенный для работы на парковых путях и на линии при обесточенном контактном рельсе (Рис. 3).

Схема электровоза содержала тиристорный импульсный преобразователь, обеспечивавший 4 режима работы его тягового привода:

- фазово-импульсная модуляция для низкой скорости движения в тяге (до 5 км/ч);
- широтно- импульсное регулирование;
- классическая рекуперация на аккумуляторную батарею с независимым возбуждением ТЭД, на скоростях выше 25 км/ч;
- импульсная рекуперация от скорости 25 км/ч и ниже до скорости 1–2 км/ч.

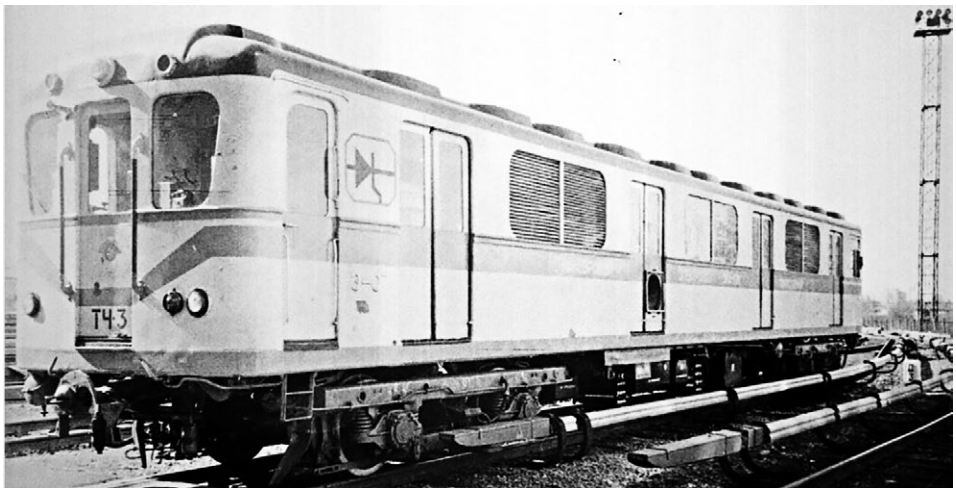


Рис. 3. Контактно – аккумуляторный электровоз Эка-07Т с тиристорным импульсным преобразователем и рекуперативным торможением, созданный на основе вагона «Д»

Fig. 3. Contact–battery electric locomotiveЭка-07 Twith a thyristor pulse converter and regenerative braking created on the basis of the “D” vehicle

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

На участках с контактным рельсом под напряжением тяга осуществлялась от него, а рекуперация всегда – на аккумуляторную батарею. Кроме экономии энергии, электровоз Эка-07Т имел и другое положительное качество: он практически не нуждался в простоях для заряда батареи (простой снижался в 4–5 раз).

Электровоз обладал запасом хода более 30 км с прицепной нагрузкой 60 т, мог двигаться по уклону 600/00 с длительной скоростью 12 км/ч. По аналогичному принципу был создан ряд других, более новых электровозов (ВЭКА и проч.)

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ В ОБЛАСТИ ЛЕГКОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА С УАХ

Легкорельсовый транспорт (ЛРТ) без использования контактной сети, примером которого является трамвай с увеличенным автономным ходом (УАХ), представляет собой инновационное решение для улучшения транспортной доступности городов и снижения автомобильного трафика. Преимущества ЛРТ, такие как: высокая проходимость, низкая стоимость эксплуатации, экологичность и комфорт, делают его привлекательным вариантом для развития городской инфраструктуры. В этом случае для увеличения автономного хода также используются суперконденсаторы и аккумуляторные батареи, что позволяет создать эффективную и экологически чистую систему городского электрического транспорта, уменьшить протяженность контактной сети обеспечить более гибкое движение по городским маршрутам. Кардинальным решением является полный отказ от контактной сети.

В Российской Федерации производством трамваев с САХ (трамваи «Витязь») с 2020 года занимаются ООО «ПК Транспортные системы», с 2023 года компания Уралтрансмаш (трамвай «Достоевский») и с 2021 года Усть-Катавский вагоностроительный завод. В настоящее время различные модификации этих трамваев (Табл. 1) успешно эксплуатируются в городах Москва, Санкт-Петербург, Таганрог и Челябинск.

В 2007 году в г. Севилье запустили трамвайный вагон, который проходит конечную остановку без контактной сети (Рис. 4). При проезде участка (без контактной сети) конечной остановки Archivode Indias пантографный токоприемник трамвайного вагона опускается. Когда вагон остановился, пантограф поднимается и несколько минут ионисторы заряжаются. Во время движения по другим участкам,

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

Таблица 1. *Технические характеристики трамвайных вагонов с системой автономного хода*

Table 1. *Technical characteristics of tram cars with an autonomous running system*

Параметр	Модель			
	71-923М	**71-931М**	**71-431Р**	**71-628-02**
Длина, мм	19405	27500	26950	16450
Ширина, мм	2500 ± 50	2500	2500+50	2500+50
Высота от уровня головки рельса, м	3,7	3,5	3,8	3,9
Масса тары, кг	26500	37000	41900	24000
Пассажировместимость, чел.	138	185	200	165
Количество мест для сиденья, шт.	45/49	60	50	42
Скорость конструкционная, км/ч	75	75	75	75
Мощность ТЭД, кВт	4×72	6×72	6×62	4×62
Накопитель электрической энергии	Аккуму-ляторная батарея	Аккуму-ляторная батарея	Аккуму-ляторная батарея	Супер-конденсатор + АБ
Емкость и количество аккумуляторных батарей, шт×А×ч	4×160	8×160	2×160	2×160
Автономный ход (протяженность), не менее, м	500	1000	300 – 3000	300 – 3000

Рис. 4. Трамвайный вагон модели Urbos 3

Fig. 4. Tramvehicle Urbos 3

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

снабженным контактной сетью, ионисторы заряжаются от последней через пантографный токоприемник [3].

Система статичной наземной подзарядки (SRS), разработанная компанией Alstom, позволяет заменить традиционную КС и пантографы, обеспечивая подзарядку транспортных средств во время их остановок. Благодаря этой системе процесс подзарядки занимает менее двадцати секунд.

Также важно отметить, что около 30% электроэнергии, необходимой для работы трамвайного вагона, вырабатывается во время его торможения. Это эффективное использование энергии и важный шаг в сторону увеличения энергоэффективности городского электротранспорта.

Сейчас имеется участок маршрута, связывающий порт с аэропортом Ницца-Лазурный берег, общая протяженность маршрута – 11,3 км, время в пути составляет 26 минут. В целом, разработка и внедрение системы от Alstom представляют собой важный шаг в развитии инновационного городского электрического транспорта.

В провинции Хунань запустили в 2017 году трамвай ART, работающий без контактной сети (Рис. 5). Данный трамвай произведен локомотивостроительной компанией города Чжучжоу, которая входит в состав корпорации CRRC. Система электропитания CAX данного трамвая содержит литий-титанатную аккумуляторную батарею. Электроэнергия, полученная при 30-секундной зарядке во время остановки, обеспечивает 5 км хода трамвая. При полном заряде аккумуляторной батареи запас автономного хода такого трамвайного вагона составляет 17 км.

Рис. 5. Трамвайный вагон ART

Fig. 5. Tram vehicle ART

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Основные технические характеристики трамвайных вагонов с УАХ представлены в Табл. 2.

Таблица 2. *Основные технические характеристики трамвайных вагонов*
Table 2. *Main technical characteristics of tram cars*

Характеристики	Трамвайный вагон Urbos 3	Трамвайный вагон ART
Применение	Испания	Китай
Производитель (компания)	CAF	CRRC Zhuzhou Locomotive Co
Вместимость, чел	250	300
Длина вагона, мм	42 856	31640
Ширина, м	2,65	2,65
Высота, м	3,4	3,4
Максимальная скорость, км/ч	70	70
Вес, тонн	56	40
Вид движения	Контактная сеть, ионисторы	Контактная сеть, литий-титанатная батарея

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Ключевым элементом системы автономного хода является бортовой накопитель электрической энергии. На сегодняшний момент времени наиболее апробировано использование в качестве накопителей аккумуляторных батарей различного типа, основные характеристики которых сведены в Табл. 3.

При выборе ТАБ для электрического транспортного средства важно учитывать все эти характеристики, чтобы обеспечить оптимальную производительность и долговечность системы питания [4].

Наиболее распространенным типом аккумуляторов для электрических транспортных средств являются литий-железо-фосфатные (LiFePO4) аккумуляторные батареи. Их характеризует: 1) высокая безопасность, т.к. они менее склонны к перегреву и воспламенению, чем другие типы литий-ионных аккумуляторов; 2) долговечность (они имеют высокий цикл прочности, т.е. они могут быть заряжены и разряжены многократно без значительной потери емкости); 3) стабильное напряжение на протяжении всего цикла разрядки. Однако, им свойственны некоторые

Received: 15.07.2024 Revised: 06.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 15.07.2024 Одобрена: 06.08.2024 Принята: 30.09.2024

Таблица 3. *Основные характеристики аккумуляторных батарей*
Table 3. *Main characteristics of storage batteries*

Тип накопителя	Никель-марганец-кобальтовая ТАБ	Литий-железо-фосфатная ТАБ	Литий-титанатная ТАБ
Производитель	EnerZ	ООО «Лиотех-Инновации»	Драйв-Электро
Емкость, А×ч	64	170	80
Масса комплекта, кг	640	1250	680
Максимальный ток, А	заряда – 320, разряда – 448	зарядка – 170, разрядка – 400	зарядка – 120, разрядка – 240
Номинальное напряжение, В	650	460	440
Тип охлаждения/ подогрева	система кондиционирования воздухом из салона	система кондиционирования воздухом из атмосферы	с помощью рабочей жидкости (антифриз)
Пробег в режиме автономного хода при номинальной нагрузке, км	7,5–10	не менее 7,5	
Время зарядки, мин	50		
Срок службы, лет	8		
Стоимость ТАБ, млн. руб.	6,5	6	8
Масса ТАБ, кг	320	650	342
Удельная энергия, Вт×ч/кг	150–220	180–200	1400
Достоинства АБ (аккумуляторных батарей)	– высокое напряжение на выходе ТАБ; – широкий диапазон рабочей температуры без дополнительных систем; – низкая масса	– низкая цена; – высокая емкость	– короткая продолжительность цикла зарядки; – надежная и эффективная система терморегулирования
Недостатки АБ	– длительные сроки ожидания отдельных видов комплектующих	– высокая масса системы; – в составе имеется система охлаждения ТАБ, требующая дополнительных затрат; – пластиковый корпус ячеек ТАБ ухудшает теплоотвод	– высокая стоимость АКБ и ремонта при выходе из строя – повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала

Received: 15.07.2024
Поступил: 15.07.2024
Revised: 06.08.2024
Одобрена: 06.08.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

недостатки, а именно: 1) низкая энергетическая плотность, что ухудшает их массогабаритные показатели; 2) более высокая стоимость по сравнению с другими типами литий-ионных аккумуляторов [5–7].

Литий-железо-фосфатные ТАБ применяются на троллейбусе модели ТРОЛЗА-5265.08 (Рис. 6).

Никель-марганец-кобальтовые (NMC) аккумуляторные батареи являются популярным типом литий-ионных аккумуляторов. Одним из достоинств которых является их высокая энергетическая плотность – они способны хранить большее количество энергии на единицу массы по сравнению с другими типами аккумуляторов. Это делает их привлекательными для использования в различных устройствах, где важна высокая энергоемкость [8, 9].

NMC аккумуляторы могут сохранять свою емкость и производительность на протяжении длительного времени использования. Быстрая скорость зарядки также является преимуществом аккумуляторов. Они способны быстро заряжаться, что делает их удобными для использования в устройствах, требующих быстрой зарядки [10, 11].

Из недостатков можно отметить относительно высокую цену, температурную зависимость параметров аккумуляторов (при низких температурах производительность NMC аккумуляторов снижается), нестабильность с точки зрения безопасности по сравнению с другими типами аккумуляторов [12].

Никель-марганец-кобальтовые батареи (NMC) производства EnerZ применяются на троллейбусе моделей АКСМ-32100D и 5298-0000010-01 Авангард (Рис. 7 и 8).

Рис. 6. Троллейбус моделиТРОЛЗА-5265.08

Fig. 6. The model of the tolleybusTROLLS-5265.08

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рис. 7. Троллейбус модели АКСМ-32100D

Fig.7. The model of the trolleybus AKSM-32100D

Рис. 8. Троллейбус модели 5298-0000010-01 Авангард

Fig. 8. The model of the trolleybus 5298-0000010-01Avangard

Третий тип литий-ионных аккумуляторов, на который следует обратить внимание, представляют литий-титанатные (LTO) аккумуляторные батареи. Чьи преимущества составляют: высокая скорость заряда/разряда; широкий диапазон рабочих температур, который включает экстремально низкие и высокие значения; долговечность (способны выдерживать большое количество циклов зарядки и разрядки). К недостаткам можно отнести низкую энергетическую плотность, т.е. плохие массогабаритные показатели, высокую стоимость изготовления [13–16].

Литий-титанатная аккумуляторная батарея (LTO) производства компании Драйв-Электро эксплуатируется на троллейбусе модели ТРОЛЗА-5265.02 (Рис. 9).

Received: 15.07.2024
Поступил: 15.07.2024
Revised: 06.08.2024
Одобрена: 06.08.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

Рис. 9. Троллейбус модели ТРОЛЗА-5265.02

Fig. 9. The model of the trolleybus TROLLS-5265.02

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье выполнен анализ электрического подвижного состава городского транспорта с автономным ходом, созданного в России и за рубежом в различные периоды времени, рассмотрены основные достоинства и недостатки такого ЭПС.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

В мире имеется опыт успешного использования подвижного состава с автономным ходом, как рельсового, так и безрельсового.

Развитие электрического подвижного состава с автономным ходом, фактически, идет по двум направлениям: системы с чисто аккумуляторным питанием и гибридные схемы с питанием от контактной сети и тяговой аккумуляторной батареи (ранее такие схемы назывались контактно-аккумуляторными).

Широкое внедрение подвижного состава с автономным ходом началось с внедрением литий-ионных аккумуляторных батарей и устройств силовой электроники (преобразователей).

Накопители энергии – тяговые аккумуляторные батареи можно использовать не только для обеспечения движения на участках без контактной сети, но и использовать их для выравнивания нагрузки в системе электроснабжения, приема энергии рекуперации, как данной подвижной единицы, так и других, осуществляющих рекуперативное торможение с отдачей энергии в контактную сеть, и даже аварийное питание контактной сети.

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава: дисс. д–ра техн. наук. СПб, 2018. EDN: ZCZMUV
2. Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Шаряков К.В., Лебедева В.А. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 4. С. 146–157. EDN: DUIIXI doi: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157
3. Парфенов С.И. Троллейбус с автономным ходом // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3-4. С. 40–41. EDN: PBZHYR
4. Metrocentro: Севильский трамвай [internet] Дата обращения: 13.07.2024. Режим доступа: https://mikhail.krivyy.com/2016/04/10/sevilla-metrocentro/
5. Иванов С.Н., Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки КнАГТУ. 2020. № I-1(41). С.37–44. EDN: AKBSNQ
6. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007.
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. ФИЗМАТЛИТ, 2015.
8. Bins K.J., Lawrenson P. Analysis and computation of electric and magnetic problems. Oxford: Pergamon Press, 1963.
9. Flankl M., Wellerdieck T., Tüysüz A., Kolar J.W. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation // IET Electric Power Applications. 2017. Vol. 12, N. 3. P. 357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
10. Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida. Kissimmee, 2015. doi:10.2514/6.2015-1587
11. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. P. 8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142
12. Beach A.E. The Pneumatic Tunnel Under Broadway. NY // Scientific American. 1870. Vol. 22, N. 10. P. 154–156. doi: 10.1038/scientificamerican03051870-154

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

13. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. In: 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT. IEEE, 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855
14. Evstaf'ev A.M., Nikitin V.V., Telichenko S.A. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport // Russ. Electr. Engin. 2020. Vol. 91. P. 77–81. doi: 10.3103/S1068371220020042
15. Nikitin V.V., Sychugov A.N., Rolle I.A., et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock // Russ. Electr. Engin. 2020. Vol. 91. P. 87–92. doi: 10.3103/S1068371220020078
16. Valinsky O.S., Evstafev A.M., Nikitin V.V. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages // Russ. Electr. Engin. 2018. Vol. 89. P. 566-570. doi: 10.3103/S1068371218100103

REFERENCES

1. Evstafev AM. Povyshenie energeticheskoj effektivnosti elektricheskogo podvizhnogo sostava: [dissertation]. St. Petersburg; 2018. (In Russ.) EDN: ZCZMUV
2. Sharyakov VA, Sharyakova OL, Sharyakov KV, Lebedeva VA. Building a system of increased autonomous running with a limitation of current consumption from the contact network. *Bulletin of the results of scientific research.* 2023;(4):146–157. (In Russ.) EDN: DUIIXI doi: 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157
3. Parfenov SI. Trollejbus s avtonomnym hodom. *Transport of the Russian Federation.* 2012;3-4:40–41. (In Russ.) EDN: PBZHYR
4. Metrocentro: Seville tram [internet] Accessed: 13.07.2024. Available from: https://mikhail.krivyy.com/2016/04/10/sevilla-metrocentro/
5. Ivanov SN, Kim KK, Prikhodchenko OV, Prosolovich AA. Theoretical foundations of mathematical modeling of power conversion processes in combined energy devices. *Scientific notes of KnAGTU.* 2020;I-1(41):37-44 (In Russ.) EDN: AKBSNQ
6. Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti.* Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte"; 2007. (In Russ.)
7. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problem tekhnicheskie resheniya.* Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
8. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems.* Oxford: Pergamon Press; 1963.
9. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications.* 2017;12(3):357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
10. Chin JC, Gray JS, Jones SM, BertonJJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida.* Kissimmee; 2015. doi:10.2514/6.2015-1587
11. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. *Procedia Engineering.* 2017;199:8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.142

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

12. Beach AE. The Pneumatic Tunnel Under Broadway. NY. *Scientific American.* 1870;22(10):154–156. doi: 10.1038/scientificamerican03051870-154
13. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. In: *2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT.* IEEE; 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855
14. Evstaf'ev AM, Nikitin VV, Telichenko SA. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:77–81. doi: 10.3103/S1068371220020042
15. Nikitin VV, Sychugov AN, Rolle IA, et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:87–92. doi: 10.3103/S1068371220020078
16. Valinsky OS, Evstafev AM, Nikitin VV. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. *Russ. Electr. Engin.* 2018;89:566–570. doi: 10.3103/S1068371218100103

Сведения об авторах:
Быльцева Василиса Дмитриевна, аспирант;
eLibrary SPIN: 1381-6240; ORCID: 0009-0004-4137-6933;
E-mail: Vasilisa7887@bk.ru
Изварин Михаил Юльевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail: misha3568723@yandex.ru
Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Information about the authors:
Vasilisa D. Byltseva, PhD student;
eLibrary SPIN: 1381-6240; ORCID: 0009-0004-4137-6933;
E-mail: Vasilisa7887@bk.ru
Mikhail Y. Izvarin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail: misha3568723@yandex.ru
Konstantin K. Kim, Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Received: 15.07.2024 **Revised: 06.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 15.07.2024 **Одобрена: 06.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

https://doi.org/10.17816/transsyst634982

© Д.Ю. Цыбин, Н.А. Ермошин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Анализируются факторы и методы обеспечения надежности металлических водопропускных труб в целях безаварийной эксплуатации автомобильных дорог. Особое внимание уделяется методам расчета конструкций с кольцевым сечением. Результатом работы являются выводы о необходимости их развития в целях обеспечения долговечности и безотказности труб посредством учета стохастического характера параметров нагрузок, конструкционных материалов и условий эксплуатации. Решение этой задачи возможно на основе оценки показателей надежности труб методами имитационного моделирования.

Ключевые слова: стальные гофрированные трубы; метод расчета по предельным состояниям; метод расчета тоннельных обделок; метод конечных элементов; нагрузки на водопропускные трубы.

Как цитировать:
Цыбин Д.Ю., Ермошин Н.А. Анализ методов расчета водопропускных сооружений автомобильных дорог // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 320–337. doi: 10.17816/transsyst634982

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© D.Yu. Tsybin, A.E. Ermoshin
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR ROAD CULVERT STRUCTURES

This analysis focuses on the factors and methods for ensuring the reliability of metal culverts, which are essential for the trouble-free operation of motorways. Special attention is paid to the calculation methods for structures with annular cross-sections. The results of the work are conclusions about the necessity of their annular cross-section. They also conclude the importance of developing these structures to enhance culverts' durability and failure-free operation. This involves considering the stochastic nature of load parameters, structural materials, and operating conditions. Addressing this issue is possible through the assessment of reliability indicators for culverts using simulation modeling methods.

Keywords: steel corrugated culverts; limit state design method; tunnel lining design method; finite element method; culvert loads.

To cite this article:
Tsybin DYu, Ermoshin NA. Analysis of calculation methods for road culverts structures. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):320–337. doi: 10.17816/transsyst634982

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги пересекают множество водотоков, что требует устройства большого количества водопропускных сооружений, основными из которых являются водопропускные трубы. Качество проектирования рассматриваемых сооружений напрямую зависит от разработанности типовых проектов, так как абсолютное большинство водопропускных труб в стране проектируются с учетом их рекомендаций. При этом типовые проекты основаны на расчетах, не учитывающих стохастический характер параметров материалов сооружения и нагрузок, действующих на конструкции. Данное обстоятельство является одной из основных причин, по которой водопропускные трубы не выдерживают межремонтные сроки.

Научная проблема заключается в отсутствии на сегодняшний день методов прогнозирования срока службы водопропускных труб с учетом режима работы и сочетания действующих нагрузок, что может быть достигнуто оценкой показателей их надежности. Решение этой проблемы аналитическими методами ввиду множества случайных факторов, оказывающих влияние на долговечность работы водопропускных сооружений, является весьма трудоемким и сложным. Наиболее приемлемым методом исследования в данном случае является построение имитационной модели работы металлических водопропускных труб для исследования воздействия на них деструктивных факторов и оценки эффективности технических и технологических решений для повышения их надежности.

Таким образом, целью данной работы является анализ методов расчета водопропускных труб, на основе которого будет возможным сделать обоснованные выводы о необходимости их усовершенствования в направлении обеспечения безотказной работы сооружений, который может быть усовершенствован путем применения имитационного моделирования, что в свою очередь позволит учесть стохастический характер нагрузок и параметров материалов.

Для достижения поставленной цели, требуется выполнение ряда задач:

1) Анализ факторов, негативно влияющих на долговечность водопропускных труб.
2) Литературный обзор существующих методов расчета водопропускных труб.

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

3) Оценка методов расчета водопропускных труб на основе ряда критериев:

а. точность метода в сравнении с натурными испытаниями;
б. уровень проработанности метода;
в. возможность детализации и рассмотрения сложных систем;
г. адаптивность применения к рассматриваемым конструкциям.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются стальные круглые гофрированные водопропускные трубы, применяемые для пропуска водотоков под насыпью автомобильных дорог. В качестве основного метода исследования в данной статье применяется аналитический обзор существующих методов расчета водопропускных труб с целью поиска оптимального метода и возможностей его усовершенствования.

Факторы, негативно влияющие на долговечность водопропускных труб, можно разделить на две основные группы:

1) Факторы окружающей среды, такие как, агрессивность водной среды по отношению к стали и железобетону и расход водного потока, пропуск которого должна обеспечить конструкция. Решение данных задач сводится к назначению допустимого размера отверстия трубы и мер по повышению износостойкости конструкции.
2) Проектные вертикальные нагрузки на конструкцию. Решение данной задачи сводится к назначению необходимой толщины стенки трубы. Следовательно, исследование надежности металлических водопропускных труб, в первую очередь, требует анализа воздействующих на них нагрузок.

В данной работе рассматриваются методы расчета водопропускных труб, учитывающие вторую группу факторов, то есть направленных на решение задачи о требуемой толщине стенки трубы, при назначенном заранее отверстии трубы, обеспечивающим пропуск расчетного расхода воды, при заданном режиме работы.

Согласно классификации, представленной в своих исследованиях Г. Клейном [1], спиральновитые гофрированные трубы относятся к пластичным и гибким конструкциям. Это обстоятельство означает, что грунт засыпки оказывает существенное сопротивление при деформациях трубы, которым нельзя пренебречь при анализе напряженно-деформированного состояния конструкции.

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

Первой нагрузкой при рассмотрении действующих сил, является собственный вес трубы. Для круглой трубы вес распределен равномерно по средней линии поперечного сечения, направление силы – вертикально вниз.

Равнодействующая нагрузки G_c будет равна [1]:

$$G_c = 2\pi\gamma_c rh \quad (1)$$

где γ_c – объемный вес материала трубы; r – средний радиус поперечного сечения трубы, м; h – толщина стенки трубы, м.

Вертикальное давление засыпки, действующее на трубу, можно разделить на действующую на верхнюю часть трубы и нижнюю. Давление на верхнюю часть трубы равняется весу вышерасположенного грунта, приходящемуся на верхний свод трубы. Так как на практике вертикальное давление засыпки на нижнюю часть трубы намного меньше, чем вертикальное давление на верхнюю часть трубы, а также ввиду устройства труб на спрофилированное по форме трубы основание, Г. Клейном было предложено не учитывать данную составляющую давления, также как и давление засыпки в угловых пазухах при высоте засыпки больше диаметра трубы. Тогда равнодействующая полного вертикального давления на верхнюю половину трубы будет равна [1]:

$$\sigma_B = \gamma H D_1, \quad (2)$$

где γ – объемный вес материала засыпки, кг/м^3; H – высота засыпки, м; D_1 – наружный диаметр трубы, м.

Схема действия нагрузок от веса насыпи и собственного веса трубы показана на Рис. 1 [1].

Горизонтальное давление также принимается равномерно распределенным, и полное боковое давление с каждой стороны будет равно:

$$\sigma_Б = \gamma H_0 D_1 \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \quad (3)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта засыпки; H_0 – глубина заложения центра трубы от поверхности земли, м.

Стоит учитывать, что осадка засыпки также происходит неравномерно и своим поведением отличается для жестких и гибких

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

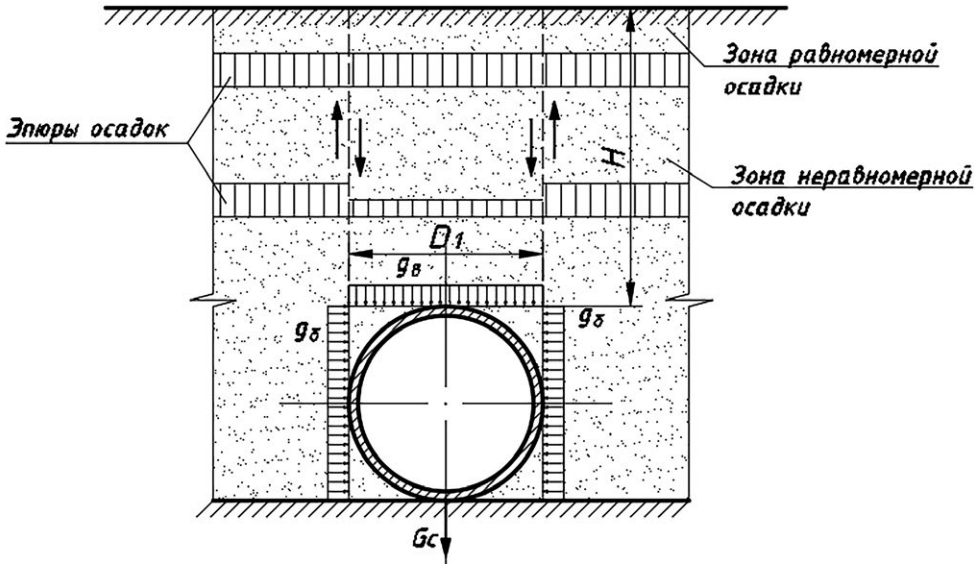


Рис. 1. Расчетная схема действия нагрузок на трубу в насыпи

Fig. 1. Calculation scheme of loads acting on the culvert in the embankment

труб. Осадка над гибкой трубой происходит быстрее ввиду меньшей жесткости относительно жесткости окружающего грунта. Вследствие этого между засыпкой над трубой и рядом с ней действуют силы трения и сцепления, направление их действия снижает полное вертикальное давление на трубу, как показано на Рис. 1, а в случае жесткой трубы полное вертикальное давление увеличивается. Этот процесс учитывается коэффициентом вертикального давления грунта насыпи $К_н < 1$ [2]. Таким образом гибкие стальные трубы воспринимают нагрузку меньше, чем жесткие трубы при равной высоте засыпки и являются более надежными.

В таком случае полное вертикальное давление будет равно:

$$\sigma_b = n\gamma K_H H D_1 \quad (4)$$

где K_H – коэффициент вертикального давления грунта насыпи; n – коэффициент перегрузки (1,2–1,4).

При расчете водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог также не обойтись без учета нагрузок от транспортных средств.

Согласно требованиям действующих нормативных документов для расчета труб применяется нагрузка типа НК, представляющая собой одиночную четырехосную тележку с нагрузкой на ось 18К и классом К 14.

Стоит учитывать, что транспортная нагрузка оказывает динамическое воздействие, которое определяется рядом факторов [1]:

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

- динамика нагрузки;
- динамика грунта;
- динамика конструкции;
- динамика материала.

Динамическое влияние транспортной нагрузки не может быть проигнорировано, так сама по себе данная нагрузка является кратковременной, вместе с тем учет каждого динамичного фактора значительно увеличил трудоемкость расчетов. Поэтому целесообразно применять общий коэффициент динамичности.

При переходе к анализу методов расчета водопропускных труб первым стоит рассмотреть метод расчета по предельным состояниям, который учитывает указанные нагрузки в виде сочетания нескольких постоянных нагрузок (собственный вес конструкции, вертикальное и боковое давления грунта насыпи) и как минимум одной временной (транспортная нагрузка Н14).

Суть метода заключается в применении ряда частных коэффициентов надежности (по нагрузке, по материалу, условий работы и т.д.) и коэффициентов сочетания данных нагрузок. Такой подход выгодно выделял данный метод по сравнению с предшествующими ему методами (методы расчета по допускаемым напряжениям, по разрушающим нагрузкам) в которых принимается единый коэффициент запаса прочности, поэтому данный метод был утвержден в качестве обязательного к применению при расчетах конструкций и сооружений, в том числе и водопропускных труб. Значительное влияние на теоретическое развитие методов расчетов труб под насыпями автомобильных дорог оказали исследования и работы Г.К. Клейна.

В своей работе [1] Г.К. Клейн выделил три предельных состояния:

- потеря несущей способности;
- развитие чрезмерных деформаций;
- появление местных повреждений, которыми для стальных труб следует считать нарушения сплошности стенок труб и их соединений.

Метод расчета по предельным состояниям является на сегодняшний день основным и отражен в нормативных документах, в которых как правило рассматриваются первые две группы предельных состояний из ранее приведенных.

Согласно [1] при проверке несущей способности из условия прочности безнапорных стальных труб расчетным внутренним усилием в упругой стадии является наибольший изгибающий момент, однако Г.К. Клейн

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

предложил учесть пластические свойства материала, тогда несущая способность трубы из условия прочности определяется формулой (5) [1]:

$$M_{пр}^{0} = mR\frac{bh^2}{4} \quad (5)$$

где R – расчетное сопротивление стали на растяжение, сжатие и изгиб, Па; m – коэффициент условий работы; b – длина рассматриваемого участка трубы, м; h – толщина стенки трубы, м.

Для приведения к расчетному неравенству для нагрузок (6) [1], путем преобразований предельная нагрузка $P_{пр}$, будет определяться по формуле (7) [1]:

$$P_{расч} \le P_{пр} \quad (6)$$

$$P_{пр} = \frac{4M_{пр}^{0}}{r} \quad (7)$$

Для расчета по второму предельному состоянию применяется условие [1]:

$$f \le f_{пр} \quad (8)$$

где f – деформация вертикального диаметра трубы, м; $f_{пр}$ – предельная деформация вертикального диаметра трубы, м.

Определяемая невозможностью дальнейшей эксплуатации трубы, для стальных труб не должна превышать 0,05D.

Для гофрированных труб применяется следующая формула (9) [1]:

$$f = \frac{0,048Q_{в}^{i}r^3}{E_c I} \quad (9)$$

где $Q_{в}^{н}$ – равнодействующая нормативной вертикальной нагрузки, Н; Ec – модуль упругости стали, Н/см^2; I – момент инерции продольного сечения стенки, см^4.

Серьезное влияние на методы расчетов водопропускных труб оказало развитие расчетных методов тоннельных обделок. В отечественной литературе можно выделить несколько методов, получивших наибольшее распространение, и описанных в работе [3].

Метод Метростроя заключается в замене кругового сечения на шестнадцатиугольник, в его углах расположены упругие опоры, заменяющие реакции основания, как показано на Рис. 2 [3].

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

Распределенные нагрузки заменяются силами, приложенными к вершинам многоугольника. В результате такой замены геометрии сечения в верхних трех вершинах отсутствуют связи, образующие угол 90°, то есть зону, в которой отсутствует отпор грунта. При этом связи направлены к центру многоугольника, если в задаче не рассматривается сила трения грунта и обделки. Исследователями метростроя было предложено для удобства ведения расчетов рассматривать схему как трехшарнирную арку ACB и шарнирную цепь ADB.

Канонические уравнения деформации имеют вид [3]:

$$\left.\begin{array}{l} M_1\delta_{11} + M_3\delta_{13} + M_4\delta_{14} + ... + M_k\delta_{1k} ... + M_n\delta_{1n} + \Delta_{1p} = 0 \\ M_1\delta_{31} + M_3\delta_{33} + M_4\delta_{34} + ... + M_k\delta_{3k} ... + M_n\delta_{3n} + \Delta_{3p} = 0 \\ ..... \\ M_1\delta_{i1} + M_3\delta_{i3} + M_4\delta_{i4} + ... + M_k\delta_{ik} ... + M_n\delta_{in} + \Delta_{ip} = 0 \\ ..... \\ M_1\delta_{n1} + M_3\delta_{n3} + M_4\delta_{n4} + ... + M_k\delta_{nk} ... + M_n\delta_{nn} + \Delta_{np} = 0 \end{array}\right\} \quad (10)$$

где δ_{ik} – единичные перемещения по направлению *i*-ой связи, вызванное реакцией *k*-ой связи; M_k – неизвестные изгибающие моменты; Δ_{np} – грузовые перемещения при количестве уравнений *n*.

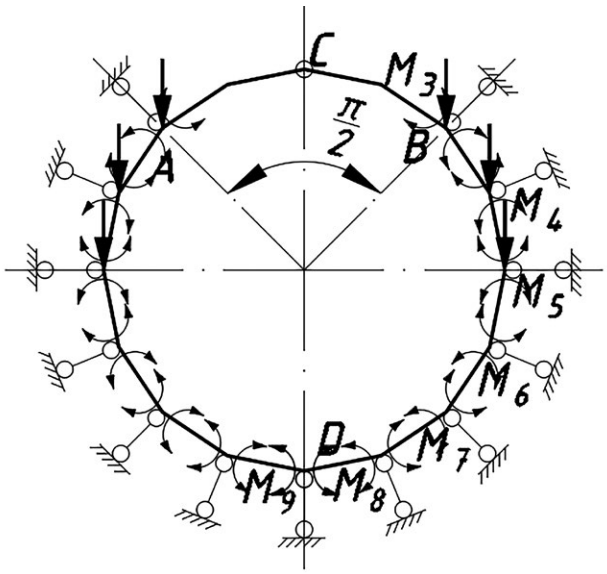


Рис. 2. Расчетная схема обделки по методу Метростроя

Fig. 2. Calculated scheme of the structure according to the Metrostroy method

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

Единичные перемещения δ_{ik} определяются по формуле (11) [3]:

$$\delta_{ik} = \sum \int_0^a \frac{\bar{M}_i \bar{M}_k ds}{EI} + \sum \frac{\bar{N}_i \bar{N}_k}{EF} a + \sum \frac{\bar{R}_i \bar{R}_k}{D} \quad (11)$$

где $\bar{M}_i, \bar{M}_k$ и $\bar{N}_i, \bar{N}_k$ – изгибающие моменты и нормальные силы в основной системе; $\bar{R}_i, \bar{R}_k$ – реакции опорных стержней, Н; a – длина стороны многоугольника, м; D – характеристика жесткости упругих опор, определяемая по формуле (12):

$$D = Kab \quad (12)$$

где K – коэффициент отпора породы; b – ширина выделенного для расчета кольца обделки, м.

Метод О.Е. Бугаевой, разработанный для расчета обделок в том числе круглого очертания изложен подробно в работе [4] и также как методы Метростроя и Метрогипротранса основан на гипотезе отпора грунта Фусса-Винклера.

Согласно эпюре отпора, показанной на Рис. 3 [3], зона отлипания также, как и в методе Метростроя составляет приближенно угол 90° и зависит от жесткости породы.

Рассматриваемая эпюра определяется по пяти точкам: двумя нулевыми в сечении π/4, двумя точками на горизонтальном диаметре $k\delta_a$, и точкой на подошве $k\delta_в$.

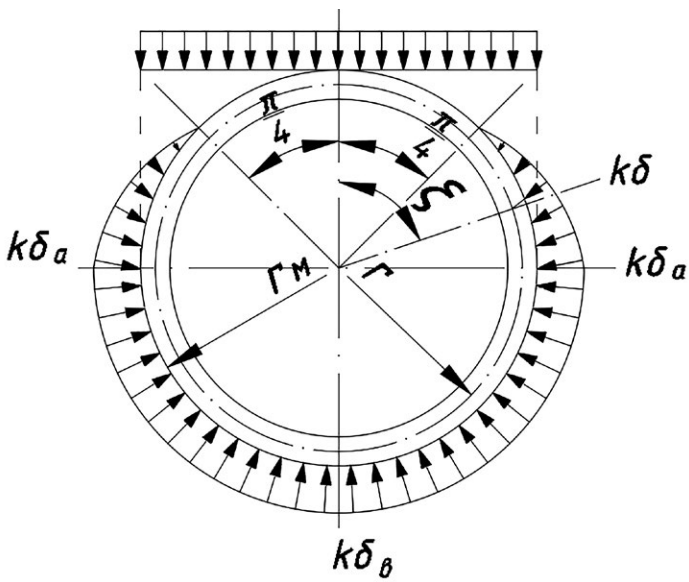


Рис. 3. Эпюра отпора по методу О.Е. Бугаевой

Fig. 3. Repulsion diagram by the method of O.E. Bugaeva

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

Очертание эпюры отпора выражается на участке (π/4≤ξ≤π/2) уравнением (13) [4]:

$$k\delta = -k\delta_a \cos 2\xi \tag{13}$$

На участке (π/2 ≤ξ ≤π) уравнением (14) [4]:

$$k\delta = k\delta_a \sin^2 \xi + k\delta_b \cos^2 \xi \tag{14}$$

где $k\delta$ – ордината эпюры отпора в рассматриваемом сечении; ξ – угол между вертикальной осью кольца и рассматриваемым сечением.

Известны исследования направленные на применение теории оболочек к расчету гофрированных конструкций [4, 5]. Результаты данного исследования основаны также на следующих предположениях:

1) В продольном направлении оболочка принимается условно-гладкой. Кривизна образующей не учитывается, то есть радиус в продольном направлении принимается равным бесконечности [4].
2) В поперечном направлении радиус от центра окружности цилиндрической оболочки до срединной поверхности заменяется функцией *r(x)*.

Согласно результатам исследования, общие уравнения равновесия цилиндрической гофрированной оболочки принимают вид [4]:

$$\frac{dN_1}{d\xi} + r(x)\bullet q_1 = 0; \frac{dQ_1}{d\xi} - N_2 + r(x)\bullet q_n = 0; \frac{dM_1}{d\xi} - Q_1 \bullet r(x) = 0; \tag{15}$$

$$\frac{dS_1}{d\xi} + r(x)\bullet q_2 = 0; \frac{\partial H_1}{d\xi} = 0; S_1 - S_2 - \frac{H_2}{r(x)} = 0 \tag{16}$$

Геометрические уравнения имеют вид [4]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{r(x)} \frac{du_1}{d\xi}; \varepsilon_2 = \frac{w}{r(x)}; x_1 = -\frac{1}{(r(x))^2} \frac{d^2 w}{d\xi^2} \tag{17}$$

$$\omega = \frac{1}{r(x)} \frac{du_2}{d\xi}; \tau = -\frac{1}{(r(x))^2} \frac{d^2 u_2}{d\xi^2} \tag{18}$$

где ξ – безразмерная величина равная $\frac{x}{r}$; N_1, N_2, Q_1, Q_2, S_1, S_2 – продольные, поперечные и сдвигающие силы; M_1, M_2, H_1, H_2 – изгибающие и крутящие

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

моменты; q_1, q_n – внешняя равномерно-распределенная нагрузка; ε_1, ε_2 – осевые деформации точки срединной поверхности оболочки; x_1, x_2 – величины, характеризующие изменения кривизны срединной поверхности оболочки; ω – сдвиг в точке срединной поверхности оболочки, возникающий в результате деформации; τ – величина, характеризующая кручение срединной поверхности оболочки; u_1, u_2, w – компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности оболочки.

Одни из наиболее актуальных исследований направлены на рассмотрение и расчет гофрированных конструкций как конструктивно ортотропных [6, 7]. В данных работах гофрированные элементы рассматриваются как гладкие пластины эквивалентной жесткости.

При таком рассмотрении конструкций связь между внутренними усилиями и обобщенными деформациями для симметричного гофра имеет вид [6]:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ 2\chi_{xy} \end{Bmatrix} \tag{19}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{20}$$

где ε_x, ε_y, γ, χ_x, χ_y, χ_{xy} – деформации срединной поверхности и изменения кривизн; A_{11}, A_{12}, A_{22}, A_{33} – жесткости при растяжении/сжатии; D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{66} – жесткости элемента оболочки при изгибе.

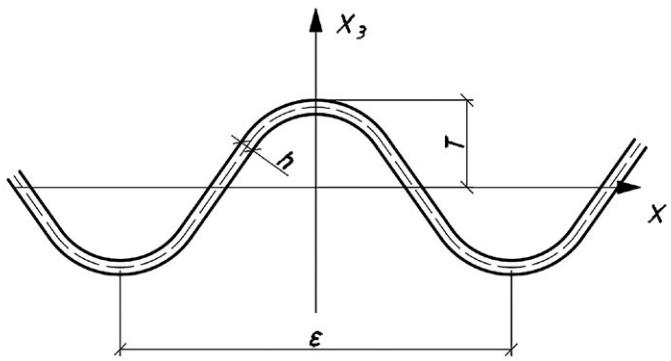


Рис. 4. Геометрия гофра

Fig. 4. Geometry of the corrugation

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

В рассматриваемом методе геометрия гофра, представленная на Рис. 4 [6], задается уравнением:

$$x_3 = x_3(X) \tag{21}$$

где X – безразмерная координата, равная x/ε, согласно рисунку 4 [6].

Суть метода заключается в том, чтобы на основании известной геометрии гофра, определить величины момента инерции гофра I и длины дуги S, с помощью которых определяются жесткости элементов при изгибе D_{ij} и при растяжении A_{ij}. Известны исследования, в которых определялись значения D_{ij} для трапециевидного гофра с учетом коэффициента Пуассона [8] и синусоидального гофра [9], следовательно, геометрия гофра имеет решающее значение в данном методе.

Одним из наиболее распространенных методов расчета в современной практике проектирования является метод конечных элементов, основанный на методе перемещений и реализованный во множестве различных программных комплексов. Многие современные исследования строительных конструкций выполнены с применением данного метода благодаря ряду преимуществ, в том числе, посвященные водопропускным трубам [10–12].

Особый интерес представляют исследования, в которых совмещено применение метода конечных элементов и полномасштабные испытания конструкций [13–15]. Данный метод позволяет рассматривать влияние дополнительных, элементов усиления на основную конструкцию. Вместе с тем возможен анализ взаимодействия различных сред с помощью контактных элементов, что особенно важно при рассмотрении системы «грунт основания-труба-грунт засыпки». Возможность задания типов поверхностей также является преимуществом метода, так как наличие трения грунта о поверхность водопропускной трубы является важным фактором, влияющим на отпор грунта засыпки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье рассматриваются методы расчета круглых стальных гофрированных водопропускных труб. Проанализированы методы расчета по предельным состояниям, методы расчета тоннельных обделок и метод конечных элементов. Каждый из данных методов имеет свои особенности, и оценка рассматриваемых методов выполнена на основе следующих факторов:

- точность метода в сравнении с натурными испытаниями;
- уровень проработанности метода;

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

- возможность детализации и рассмотрения сложных систем;
- адаптивность применения к рассматриваемым конструкциям.

Метод расчета по предельным состояниям, описанный Г.К. Клейном для стальных труб дает широкое представление о работе конструкции под насыпью автомобильной дороги. Изложенный метод явно пересекается с нормативными документами. Существует неоднозначность при назначении коэффициента вертикального давления грунта насыпи исходя из рекомендаций или исходя из расчета, с чем необходимо определиться исследователю. Рекомендованные значения коэффициента равны или больше единицы, а его значения при расчете могут принимать значения меньше единицы, что свидетельствует об стремлении обеспечить более высокий запас прочности конструкции, что может рассматриваться с одной стороны как рациональное решение ввиду не стопроцентной точности расчетов, а с другой как нерациональное решение.

Исходя из приведенных критериев можно заключить, что рассмотренный метод обладает достаточной точностью результатов, что подтверждается его распространенностью в строительной отрасли и множеством реализованных проектов. Указанный метод имеет явные преимущества по сравнению с предшествующими ему методами по допускаемым напряжениям и по разрушающим усилиям благодаря введению частных коэффициентов надежности, и в большей степени описывает работу рассматриваемых конструкций.

Методы, предложенные исследователями ОАО «Метрострой» и О.Е. Бугаевой являются более современными и лучше отражают отпор грунта вокруг конструкции, но разработаны для обделок тоннелей и требуют адаптации расчетов для стальных водопропускных труб. Метод Метростроя является весьма трудоемким в виду большого количества рассматриваемых узлов, вместе с этим количество данных узлов напрямую влияет на точность расчетов. При этом низкая детализация расчетной схемы может привести к результатам, значительно отличающимся от напряжений и перемещений, возникающих в реальных конструкциях при их эксплуатации, что повышает риск выхода из строя сооружения, вследствие этого для данных методов требуется значительная детализация схемы и автоматизация расчетов.

Методы расчета, разработанные на основе теории оболочек и метод расчета гофрированных конструкций как конструктивно-ортотропных являются наиболее современными, вместе с тем наиболее полно учитывают влияние геометрии гофра в отличие от остальных описанных

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

аналитических методов. Исходя из литературного обзора рассмотренные методы могут быть успешно применены к различным типам конструкций, в том числе и для расчета гофрированных водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог. Анализ исследований с применением данных методов показал высокую точность, получаемых результатов, вместе с тем методы являются достаточно трудоемкими, но не лишены возможности автоматизации.

Метод конечных элементов благодаря ряду преимуществ, таких как автоматизация расчетов, реализованных в специальных программных комплексах, возможность учета большого количества факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции (возможность учета стадийности возведения сооружения и т.д.), возможность построения сложных трехмерных моделей, состоящих из нескольких конструкций, и высокая точность расчетов, может быть применен в качестве сравнительного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно поставленным задачам, в работе были выполнены:
2. Анализ влияния нагрузок, действующих на водопропускные трубы, включающий собственный вес трубы, вес грунта насыпи и транспортную нагрузку.Обзор существующих методов расчета водопропускных труб.
3. Обоснована необходимость усовершенствования методов, применением принципов системного подхода, методов имитационного моделирования и математической теории надежности расчета с целью оценки влияния отклонений параметров материалов и выявления закономерности влияния физико-механических и эксплуатационных характеристик конструкционных материалов водопропускных труб на срок безотказной работы сооружения.

Необходимо отметить, что проанализированные методы расчета труб являются строго детерминированными, не учитывают стохастический характер нагрузок, ориентированы на применение нормированных значений переменных и констант в форме их математических ожиданий. Указанные обстоятельства могут привести к тому, что даже при допустимых отклонениях физико-механических характеристик грунтов и конструктивных материалов водопропускных труб, параметров технологических процессов строительства, а также состава и интенсивности транспортного потока возможны ситуации, когда все

Received: 07.07.2024 Revised: 10.08.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 07.07.2024 Одобрена: 10.08.2024 Принята: 30.09.2024

воздействующие факторы окажутся на нижнем уровне допустимых значений. Такое их сочетание вызовет преждевременное разрушение и отказ в работе водопропускных сооружений в межремонтный период. В связи с этим требуется разработка методов оценки и повышения надежности водопропускных труб при их проектировании, строительстве и эксплуатации. На основе выполненного анализа можно заключить, что наиболее подходящими аналитическими методами для дальнейшего имитационного моделирования являются методы расчета конструкций как конструктивно ортотропных и по предельным состояниям.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле. Москва: Госстройиздат, 1957. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: http://www.amac.md/biblioteca/data/25/17/02/24.2.pdf
2. Колоколов Н.М., Янковский О.А., Щербина К.Б. Черняховская С.Э. Металлические гофрированные трубы под насыпями. Москва: Транспорт, 1973. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: https://elima.ru/books/?id=5544
3. Бугаева О.Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей. Ленинград: ЛИИЖТ, 1966. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: https://elima.ru/books/?id=2337
4. Осокин И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб // Интернет-журнал науковедение. 2013. Т. 15, № 2. С. 34. EDN: QJCLNN
5. Чепурненко А.С., Язьев Б.М., Турко М.С. Расчет металлических гофрированных оболочек при осесимметричном нагружении // Инженерный вестник Дона. 2018. Т. 50, № 3. С. 126. EDN: YRQOEP
6. Турко М.С., Чепурненко А.С., Язьев Б.М. Расчет металлических гофрированных конструкций как конструктивно ортотропных // Инженерный вестник Дона. 2018. Т. 51, № 4. С. 199. EDN: MYOBRX
7. Ye Z., Berdichevsky V.L., Yu W. An equivalent classical plate model of corrugated structures // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51, N. 11–12. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.02.025
8. Briassoulis D. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets // Computers and Structures. 1986. Vol. 23, N. 2. doi: 10.1016/0045-7949(86)90207-5

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

9. Alshabatat N. Design of corrugated plates for optimal fundamental frequency // Advances in Acoustics and Vibration. 2016. N. 1. doi: 10.1155/2016/4290247
10. Горшков Н.И., Краснов М.А., Ловцов А.Д., Федорова В.С. Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния системы «металлическая гофрированная труба (МГТ) – основание–насыпь» на основе МКЭ // Вестник гражданских инженеров. 2019. Т. 74, № 3. С. 152–160. doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160
11. Тимчук Д.В., Ловцов А.Д. Особенности расчета гофрированной водопропускной трубы. В кн.: Материалы секционных заседаний 60-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ; Апрель 26–30 2020. Хабаровск: ТОГУ, 2020. EDN: GWIJOF
12. Kunecki B. Full-scale test of corrugated steel culvert and FEM analysis with various static systems // Studia Geotechnica et Mechanica. 2006. Vol. 28, N. 2. P. 39–54. doi: 10.1061/40946(248)98
13. Beben D., Stryczek A. Numerical analysis of corrugated steel plate bridge with reinforced concrete relieving slab // Journal of Civil Engineering and Management. 2016. Vol. 22, N. 5. P. 585–596. doi: 10.3846/13923730.2014.914092
14. Kolisoja P., Kalliainen A. Modelling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 427–434. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.054
15. Новодзинский А.Л., Клевеко В.И. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 81–94. EDN: PMSLTT

REFERENCES

1. Klein GK. *Calculation of culverts laid in the ground.* Moscow: Gosstroyizdat; 1957. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: http://www.amac.md/biblioteca/data/25/17/02/24.2.pdf
2. Kolokolov NM, Yankovsky OA, Shcherbina KB, Chernyakhovskaya SE. *Metallic corrugated culverts under embankments.* Moscow: Transport; 1973; 117. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: https://elima.ru/books/?id=5544
3. Bugaeva OE. *Designing of transport tunnel linings.* Leningrad: LIIZHT, 1966. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: https://elima.ru/books/?id=2337
4. Osokin IA. Application of the theory of shells of rotation to the calculation of corrugated culverts. *Bulletin of Eurasian Science.* 2013;2(15):34. (In Russ.). EDN: QJCLNN
5. Chepurnenko AS, Yazyev BM, Turko MS. Calculation of metallic corrugated shells under axisymmetric loading. *Inženernyj vestnik Dona*. 2018;3(50):126. (In Russ.). EDN: YRQOEP
6. Turko MS, Chepurnenko AS, Yazyev BM. Calculation of metal corrugated structures as structurally orthotropic. *Inženernyj vestnik Dona.* 2018;4(51):199. (In Russ.). EDN: MYOBRX

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

7. Zheng Ye, Berdichevsky VL, Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures. *International Journal of Solids and Structures.* 2014;51: 2073-2083.
8. Briassoulis D. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets. *Computers & Structures.* 1986;23:129–138. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11264
9. Alshabatat N. Design of corrugated plates for optimal fundamental frequency. *Advances in Acoustics and Vibration.* 2016. doi: 10.1155/2016/4290247
10. Gorshkov NI, Krasnov MA, Lovtsov AD, Fedorova VS. Analysis and evaluation of stress-strain state of the system "metal corrugated pipe (MCT) – base – embankment" on the basis of FEM. *Bulletin of Civil Engineers.* 2019;3(74):152–160. (In Russ.). doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160
11. Timchuk DV, Lovtsov AD. Peculiarities of the corrugated culvert calculation. In: *Proceedings of the sectional sessions of the 60th Student Scientific and Practical Conference of TOGU; 2020 Apr 26–30; Khabarovsk.* Khabarovsk: TOGU; 2020. (In Russ.). EDN: GWIJOF
12. Kunecki B. Full-scale test of corrugated steel culvert and FEM analysis with various static systems. *Studia Geotechnica et Mechanica.* 2006;28(2):39–54. doi: 10.1061/40946(248)98
13. Beben D, Stryczek A. Numerical analysis of corrugated steel plate bridge with reinforced concrete relieving slab. *Journal of Civil Engineering and Management.* 2016;22(5):585–596. doi: 10.3846/13923730.2014.914092
14. Kolisoja P, Kalliainen A. Modelling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D. *Procedia Engineering.* 2016;143:427–434. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.054
15. Novodzinsky AL, Kleveko VI. Accounting for the influence of corrugated element thickness on the strength and stability of a metal culvert. *Vestnik of PNIPU.* Construction and architecture. 2012;1:81–94. (In Russ.). EDN: PMSLTT

Сведения об авторах:
Цыбин Дмитрий Юрьевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 1977-1543; ORCID: 0000-0002-6074-3995;
E-mail: dmitryts32@gmail.com
Ермошин Николай Алексеевич, д.воен.н, профессор;
eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;
E-mail: ermonata@mail.ru

Information about the authors:
Dmitry Yu. Tsybin, postgraduate student;
eLibrary SPIN: 1977-1543; ORCID: 0000-0002-6074-3995;
E-mail: dmitryts32@gmail.com
Nikolay A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-6074-3995;
E-mail: ermonata@mail.ru

Received: 07.07.2024 **Revised: 10.08.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 07.07.2024 **Одобрена: 10.08.2024** **Принята: 30.09.2024**

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

https://doi.org/10.17816/transsyst630998

© А.В. Саушев, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко
Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова
(Санкт-Петербург, Россия)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ АЛГОРИТМОВ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Цель. Оценка эффективности неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции трехфазных напряжений при частотном управлении электроприводами по критерию интегральной дисперсии тока в нагрузке.

Материалы и методы. Для исследования процессов широтно-импульсной модуляции при частотном управлении электроприводами в системе преобразователь–электродвигатель использованы методы теории электрических цепей; предложенные алгоритмы иллюстрируются рисунками и могут быть реализованы в программной среде матричной лаборатории.

Результаты. Рассмотрен процесс широтно-импульсной модуляции в системе преобразователь–электродвигатель. Показано, что что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя частоты целесообразно применение неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции. Проанализированы выражения для локальной дисперсии межфазного тока при однофазной и двухфазной модуляции. Получено выражение для локальной дисперсии тока в нагрузке трехфазной мостовой цепи. Введено понятие и получено выражение для интегральной дисперсии тока в трехфазной нагрузке. Предложены показатели оценки эффективности алгоритмов неполнофазной широтно-импульсной модуляции. Построены графики коэффициента эффективности, характеризующие неполнофазную широтно-импульсную модуляцию с минимальным числом коммутаций ключевых элементов в функции коэффициента амплитуды и в функции относительной частоты модуляции.

Заключение. Результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления преобразователями частоты в системах асинхронного электропривода.

Ключевые слова: широтно-тимпульсная модуляция; неполнофазные алгоритмы; система преобразователь–электродвигатель; дисперсия тока в нагрузке; оценка эффективности модуляции.

Как цитировать:
Саушев А.В., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Оценка эффективности неполнофазных алгоритмов широтно-импульсной модуляции в системе преобразователь-электродвигатель // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 338–350. doi: 10.17816/transsyst630998

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© A.V. Saushev, I.V. Belousov, V.F. Samoseiko
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
(St. Petersburg, Russia)

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF INCOMPLETE-PHASE PULSE WIDTH MODULATION ALGORITHMS IN THE CONVERTER-ELECTRIC MOTOR SYSTEM

Aim. This study evaluates the effectiveness of incomplete-phase algorithms for pulse width modulation of three-phase voltages in frequency control of electric drives, using integral current dispersion in the load as the criterion.

Materials and methods. This study examines pulse width modulation processes in frequency-controlled electric drives, focusing on the converter-electric motor system. Methods from electric circuit theory are used, with proposed algorithms illustrated through drawings, and these drawing can be implemented in the matrix laboratory software.

Results. The process of pulse width modulation in the converter-electric motor system is considered. It is demonstrated that to minimize the number of switching keys in the frequency converter, incomplete-phase pulse width modulation algorithms are beneficial. Expressions for local dispersion of the interphase current in single-phase and two-phase modulation are analyzed. An expression for local current dispersion in a three-phase bridge circuit load is derived, and the concept of integral current dispersion in a three-phase load is derived. Indicators for evaluating the effectiveness of algorithms for incomplete-phase pulse width modulation are proposed. Graphs the efficiency coefficient, characterizing incomplete-phase pulse width modulation with a minimum number of switching of key elements in the function of the amplitude coefficient and in the function of the relative frequency of modulation are constructed.

Conclusion. The results aid in developing algorithms for controlling frequency converters in asynchronous electric drive systems.

Key words: pulse width modulation; incomplete-phase algorithms; converter-electric motor system; current dispersion in the load; evaluation of modulation efficiency.

To cite this article:
Saushev AV, Belousov IV, Bova EV, Samoseiko VF. Evaluation of the effectiveness of incomplete phase pulse width modulation algorithms in the converter-electric motor system. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):338–350. doi: 10.17816/transsyst630998

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Системы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) находят самое широкое использование при синтезе разнообразных систем управления электроприводами. На транспорте, в настоящее время, основное применение находит асинхронный электропривод, для управления которым, как правило, используются системы частотного скалярного и векторного управления. Одной из важнейших задач ШИМ напряжения, формируемого электронно-ключевым преобразователем в системе преобразователь–электродвигатель, является снижение пульсаций тока на периоде модуляции [1–6]. При этом мера расхождения между желаемым напряжением и его импульсной аппроксимацией является важнейшей характеристикой качества модуляции. Чем меньше это расхождение, тем выше качество модуляции. Показатели качества ШИМ существенно зависят от частоты следования импульсов. При этом, с одной стороны, увеличение частоты модуляции позволяет более точно формировать напряжение на выходе преобразователя частоты, приблизив его к синусоидальной функции, а, с другой стороны, ведет к возрастанию динамических потерь в электронных ключах этого преобразователя, который является важнейшим силовым элементом электропривода. Таким образом, повышение качества модуляции лишь за счет повышения частоты модуляции не дает желаемого эффекта и приводит к дополнительным потерям.

В работе [7] установлено, что основным критерием, определяющим качество модуляции, по которому следует сравнивать алгоритмы ШИМ, является дисперсия тока в нагрузке. При этом важнейшим показателем качества ШИМ является также число коммутаций ключей преобразователя частоты. Это обусловлено тем, что уменьшение числа коммутаций ключей на периоде модулирующей функции ведет к снижению динамических потерь энергии в электронных ключах. В работах [3–6, 8–13] показано, что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя частоты целесообразно применение неполнофазных алгоритмов ШИМ (Н-ШИМ). Возможные алгоритмы Н-ШИМ достаточно подробно рассмотрены в работе [14].

Очевидно, что реализация любого алгоритма Н-ШИМ приведет к увеличению дисперсии тока, которая, как отмечалось, является критерием качества модуляции. Однако, минимизация числа коммутаций, которая имеет место в Н-ШИМ ведет к снижению динамических потерь энергии в ключах, что позволит увеличить частоту модуляции и уменьшить дисперсию тока.

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Целью статьи является оценка алгоритмов модуляции Н-ШИМ трехфазного напряжения по величине дисперсии тока при заданных потерях энергии в ключевых элементах. Для решения указанной задачи необходимо найти интегральную дисперсию тока, порождаемую алгоритмы Н-ШИМ и сравнить ее с интегральной дисперсией тока, которая имеет место при полнофазной ШИМ (П-ШИМ).

ЛОКАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ ТОКА В АЛГОРИТМАХ НЕПОЛНОФАЗНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ШИМ

Известно, что широтно-импульсная модуляция трехфазного напряжения реализуется на трех электронно-ключевых полумостах преобразователя частоты (Рис. 1).

Полумосты трехфазного электронно-ключевого моста далее обозначаются *A, B, C*. Управление полумостами осуществляется так, что включен либо верхний, либо нижний ключ. Следовательно, для описания управления полумостами $X = A, B, C$ достаточно задать, коммутационные импульсные функции верхних ключей.

Предполагается, что заданы модулирующие функции фазных напряжений $g_A = u_A/U_d$; $g_B = u_B/U_d$; $g_C = u_C/U_d$, где u_A, u_B, u_C – фазные напряжения на нагрузке; U_d – напряжение источника питания, которые удовлетворяют соотношению $g_A + g_B + g_C = 0$.

Модулирующие функции линейных напряжений $g_{AB} = u_{AB}/U_d$; $g_{BC} = u_{BC}/U_d$; $g_{CA} = u_{CA}/U_d$ связаны с модулирующими функциями фазных

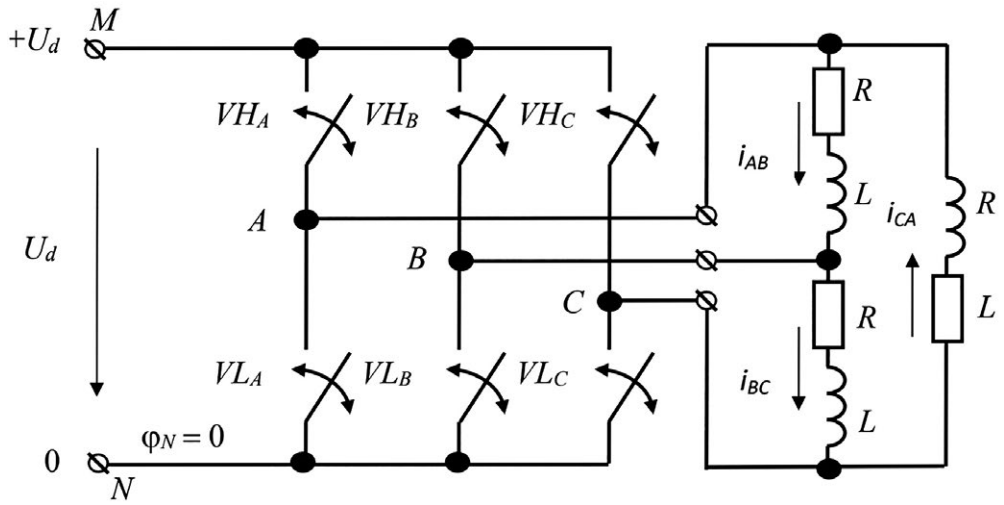


Рис. 1. Иллюстрация широтно-импульсной модуляции напряжения

Fig. 1. Illustration of pulse-width voltage modulation

Received: 20.05.2024
Поступил: 20.05.2024
Revised: 06.07.2024
Одобрена: 06.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

напряжений и модулирующими функциями потенциалов полумостов известными соотношениями [14]:

$$g_{AB} = g_A - g_B = \gamma_A - \gamma_B; g_{BC} = g_B - g_C = \gamma_B - \gamma_C g_{CA} = g_C - g_A = \gamma_C - \gamma_A,$$

где γ_X – скважность импульса в полумосте $X = A, B, C$.

В работе [15] показано, что если заданы модулирующие функции фазных напряжений $g_A(\tau)$, $g_B(\tau)$, $g_C(\tau)$, то булева переменная x_0, определяющая чередование включенного состояния верхних и нижних ключей мостовой схемы (Рис. 1) будет иметь вид:

$$x_0(\beta) = 1(-g_A(\tau-\beta)\cdot g_B(\tau-\beta)\cdot g_C(\tau-\beta)), \quad (1)$$

где τ – относительное время; $\beta \in [-f^*/12, f^*/12]$ – параметр сдвига булевой функции; f^* – относительная частота модуляции.

В алгоритме Н-ШИМ в двух фазах нагрузки выполняется однофазная модуляция напряжения, а в третьей фазе – двухфазная. Для определения дисперсии тока в нагрузке достаточно рассмотреть ситуацию, когда модулирующие функции фазных напряжений удовлетворяют неравенствам $g_A \geq g_B \geq g_C$. Будем полагать, что включен нижний ключ полумоста C и потенциал узла C равен нулю. Тогда между узлами A–C и B–C трехфазной мостовой цепи (Рис. 1) будет однофазная модуляция, между узлами A–B – двухфазная.

Локальная дисперсия тока при однофазной модуляции, как показано в работе [7] определяется выражением

$$D_X = D(\gamma_X, \Delta\gamma_X, \Delta\alpha_X) = \varepsilon^2 \cdot \lim_{\varepsilon\to 0} \frac{D(\gamma_X, \alpha_X, \Delta\gamma_X, \varepsilon)}{\varepsilon^2} =$$

$$= \frac{\varepsilon^2}{12}\cdot\begin{pmatrix} {\gamma_X}^2\cdot(1-\gamma_X)^2 + 12\cdot{\gamma_X}^2\cdot{\Delta\alpha_X}^2 - \\ -\gamma_X\cdot\Delta\alpha_X\cdot\Delta\gamma_X\cdot\left(3-{\gamma_X}^2-4\cdot\Delta\alpha_X\right)+{\Delta\gamma_X}^2/10 \end{pmatrix},$$

где $\Delta\alpha_X = \alpha_X - (1-\gamma_X)/2$ – коэффициент смещения импульса относительно середины интервала ШИМ; γ_X – моделирующая функция потенциала полумоста (потенциал узла X); $\Delta\gamma_X$ – приращение моделирующей функции полумоста на интервале модуляции.

Используя это выражение, запишем локальную дисперсию тока $D_{AC} = D(g_{AC}, \Delta g_{AC}, \Delta\alpha_{AC})$ при однофазной модуляции между узлами A–C и дисперсию $D_{BC} = D(g_{BC}, \Delta g_{BC}, \Delta\alpha_{BC})$ между узлами B–C трехфазной мостовой цепи (Рис. 1) в следующем виде:

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

$$D_{AC} = \frac{\varepsilon^2}{12} \cdot \left(\begin{array}{c} g_{AC}{}^2 \cdot (1 - g_{AC})^2 + 12 \cdot g_{AC}{}^2 \cdot \Delta\alpha_{AC}{}^2 - \\ - g_{AC} \cdot \Delta\alpha_{AC} \cdot \Delta g_{AC} \cdot \left(3 - g_{AC}{}^2 - 4 \cdot \Delta\alpha_A\right) + \Delta g_{AC}{}^2 / 10 \end{array} \right),$$

$$D_{BC} = \frac{\varepsilon^2}{12} \cdot \left(\begin{array}{c} g_{BC}{}^2 \cdot (1 - g_{BC})^2 + 12 \cdot g_{BC}{}^2 \cdot \Delta\alpha_{BC}{}^2 - \\ - g_{BC} \cdot \Delta\alpha_{BC} \cdot \Delta g_{BC} \cdot \left(3 - g_{BC}{}^2 - 4 \cdot \Delta\alpha_{BC}\right) + \Delta g_{BC}{}^2 / 10 \end{array} \right),$$

где $g_{AC} = g_A - g_C$; $\Delta g_{AC} = \Delta g_A - \Delta g_C$; $\Delta\alpha_{AC} = \Delta\alpha_A - \Delta\alpha_C = 11/96 \cdot \Delta g_{AC}$; $g_{BC} = g_B - g_C$; $\Delta g_{BC} = \Delta g_B - \Delta g_C$; $\Delta\alpha_{BC} = \Delta\alpha_B - \Delta\alpha_C = 11/96 \cdot \Delta g_{BC}$.

Локальная дисперсия межфазного тока i_{AB} при двухфазной модуляции на основании работы [7] определяется выражением

$$D_{XY}(g_{XY}, g_0) = \varepsilon^2 \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{(1 - g_{XY})^2 \cdot g_{XY}{}^2}{48} + \frac{\Delta\alpha_{XY}{}^2 \cdot \left(1 + (1 - g_{XY})^2\right)}{4} - \\ - \frac{\Delta\alpha_{XY} \cdot \Delta g_{XY} \cdot (11 - 3 \cdot g_{XY}{}^2)}{96} + \frac{g_0{}^2 \cdot g_{XY}{}^2}{4} + \frac{\Delta g_{XY}{}^2}{120} \end{array} \right).$$

Используя это выражение, получим локальную дисперсию тока $D_{AB} = D(g_{AB}, \Delta g_{AB}, \Delta\alpha_{AB})$ между узлами *A–B* трехфазной мостовой цепи (Рис. 1):

$$D_{AB} = \varepsilon^2 \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{(1 - g_{AB})^2 \cdot g_{AB}{}^2}{48} + \frac{g_0{}^2 \cdot g_{AB}{}^2}{4} + \frac{\Delta\alpha_{AB}{}^2 \cdot \left(1 + (1 - g_{AB})^2\right)}{4} - \\ - \frac{\Delta\alpha_{AB} \cdot \Delta g_{AB} \cdot (11 - 3 \cdot g_{AB}{}^2)}{96} + \frac{\Delta g_{AB}{}^2}{120} \end{array} \right),$$

где $g_{AB} = g_A - g_B$; $\Delta g_{AB} = \Delta g_A - \Delta g_B$; $\Delta\alpha_{AB} = \Delta\alpha_A - \Delta\alpha_B = 11/96 \cdot \Delta g_{AB}$.

Так как линейные и фазные переменные этих дисперсий связаны между собой известными соотношениями, то сами дисперсии можно рассматривать как функции фазных переменных. Локальную дисперсию тока в нагрузке трехфазного моста можно найти как среднее значение дисперсий токов между полумостами *X = A, B, C*:

$$D_{ABC} = D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X, g_0) = \frac{D_{AB} + D_{BC} + D_{AC}}{3}.$$

Локальная дисперсия токов в нагрузке трехфазного моста будет знакоположительной пульсирующей функцией с периодом пульсаций $f^*/6$, где f^* – относительная частота модуляции.

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ ТОКА

Поскольку наиболее востребованными являются алгоритмы с синусоидальными модулирующими функциями напряжений, то интегральную дисперсию тока будем находить при синусоидальных модулирующих функциях фазных напряжений $X = 1, 2, 3$ [7, 15]

$$g_X = \frac{a}{\sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} - (X-1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3} \right),$$

где a – коэффициент амплитуды напряжения.

Приращения модулирующих функций фазных напряжений на периоде ШИМ определяются выражением

$$\Delta g_X = \frac{\partial g_X}{\partial \tau} = \frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{\sqrt{3} \cdot f^*} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} - (X-1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) < 0{,}363 .$$

Модулирующие функции линейных напряжений связаны с модулирующими функциями фазных напряжений соотношениями

$$\Delta g_{AB} = \Delta g_A - \Delta g_B ;\ \Delta g_{BC} = \Delta g_B - \Delta g_C ;\ \Delta g_{CA} = \Delta g_C - \Delta g_A ;$$

$$\Delta g_A = \frac{\Delta g_{AB} - \Delta g_{CA}}{3};\ \Delta g_B = \frac{\Delta g_{BC} - \Delta g_{AB}}{3};\ \Delta g_C = \frac{\Delta g_{CA} - \Delta g_{BC}}{3}.$$

Смещения импульсов относительно центра интервала ШИМ полумостов $X = A, B, C$ на основании работы [7] будем учитывать выражением $\Delta\alpha_X = \Delta\alpha_X{}^{\mathrm{O}} = 0{,}1146 \cdot \Delta g_X$, которое минимизирует дисперсию тока в нагрузке.

Так как коэффициент смещения импульсов Δa_X и функция предмодуляции g_0 зависят от относительного времени τ, то локальную дисперсию тока в нагрузке трехфазного моста D_{ABC} следует рассматривать как сложную функцию относительного времени τ.

Интегральную дисперсию тока в трехфазной нагрузке будем рассматривать как функцию от коэффициента амплитуды a, относительной частоты модуляции f^*, коэффициента смещения импульсов Δa_X и функции предмодуляции g_0. Определим интегральную дисперсию тока для двух значений параметра сдвига булевой функции $\beta = 0$ и $\beta = f^*/12$. В зависимости от вида функции предмодуляции, полученной в работе [14]:

$$g_0(\beta) = \begin{pmatrix} 1/2 - x_0(\beta) + x_0(\beta) \cdot \max\{g_A, g_B, g_C\} + \\ +(1 - x_0(\beta)) \cdot \min\{g_A, g_B, g_C\} \end{pmatrix}$$

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

интегральную дисперсию тока можно вычислить по формулам:

$$ED(a, f^*, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{HL0}) = \frac{6}{f^*} \cdot \int_0^{f^*/6} D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{HL0}) \cdot d\tau = \\ = \frac{\varepsilon^2 \cdot a^2}{24} \cdot \left(1 - 1{,}80 \cdot a + 0{,}85 \cdot a^2 + \frac{3{,}95 - 6{,}73 \cdot a + 1{,}56 \cdot a^2 + 4{,}12 \cdot a^3}{f^{*2}}\right) \quad (2)$$

$$ED(a, f^*, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{HL1}) = \frac{6}{f^*} \cdot \int_0^{f^*/6} D(g_X, \Delta g_X, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{HL1}) \cdot d\tau = \\ = \frac{\varepsilon^2 \cdot a^2}{24} \cdot \left(1 - 1{,}86 \cdot a + 0{,}91 \cdot a^2 + \frac{3{,}95 - 6{,}35 \cdot a + 1{,}56 \cdot a^2 + 2{,}92 \cdot a^3}{f^{*2}}\right), \quad (3)$$

где $D(g_X, \gamma_0, \Delta g_X, \Delta\alpha_X)$ – локальная дисперсия D_{ABC} токов в нагрузке трехфазного моста; $\varepsilon = T_0/T$ – характеристика фильтрующих свойств нагрузки, T – постоянная времени фильтра, T_0 – период модуляции; $g_0{}^{HL0} = g_0(0)$ и $g_0{}^{HL1} = g_0(f^*/12)$ – функции предмодуляции при значениях параметра сдвига булевой функции $\beta = 0$ и $\beta = f^*/12$.

По формулам (2) и (3) определяются дисперсии тока при значениях параметра сдвига булевой функции (1) на границах интервала $\beta \in [0, f^*/12]$.

Для сравнительной оценки алгоритмов Н-ШИМ сформируем критерий в виде коэффициентов эффективности:

$$Z_{HL0}(a, f^*) = \frac{ED(a, f^*, \Delta a_X{}^{O}, g_0{}^{O})}{ED(a, f^*, \Delta a_X{}^{O}, g_0{}^{HL0})} \text{ и } Z_{HL1}(a, f^*) = \frac{ED(a, f^*, \Delta a_X{}^{O}, g_0{}^{O})}{ED(a, f^*, \Delta a_X{}^{O}, g_0{}^{HL1})},$$

где $ED(a, f^*, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{O})$ – минимальное значение интегральной дисперсии тока в трехфазной нагрузке при оптимальной функции предмодуляции и коэффициенте смещения импульсов $\Delta a_X{}^{O} = \Delta a_X$ ($X = A, B, C$).

Выражения для минимального значения дисперсии и функции предмодуляции получены в работах [7, 15] и имеют вид:

$$ED(a, f^*, \Delta\alpha_X{}^{O}, g_0{}^{O}) = \frac{\varepsilon^2 \cdot a^2}{96} \cdot \left(1 - \frac{16 \cdot a}{3 \cdot \pi} + \frac{7 \cdot a^2}{8} + \frac{3{,}3 - 5{,}3 \cdot a + 6{,}3 \cdot a^2}{f^{*2}}\right).$$

$$g_0 = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right),$$

где a – коэффициент амплитуды напряжения.

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

Графики коэффициента эффективности, характеризующие алгоритмы Н-ШИМ при различных значениях параметра сдвига β булевой функции (1) приведены на Рис. 2.

Из данных графиков следует, что параметр сдвига β булевой функции (1) не значительно влияет на дисперсию токов трехфазной нагрузки. Наименьшее значение дисперсия тока принимает при значении параметра сдвига $\beta = f^*/12$. При малых значениях коэффициента амплитуды эффективность использования алгоритма Н-ШИМ существенно снижается. При стремлении коэффициента амплитуды напряжения к нулю $a \to 0$ дисперсия тока алгоритма Н-ШИМ увеличивается в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование в системах частотного управления электроприводами алгоритмов Н-ШИМ объективно приводит к увеличению дисперсии тока в нагрузке, которая является основным критерием качества модуляции. Вместе с тем, минимизация числа коммутаций ключевых элементов, которую обеспечивают алгоритмы Н-ШИМ приводит к снижению динамических потерь энергии в этих элементах и как следствие повышает частоту модуляции и снижают дисперсию тока. Полученная оценка эффективности алгоритмов Н-ШИМ позволяет количественно сравнить между собой алгоритмы Н-ШИМ и П-ШИМ в конкретных

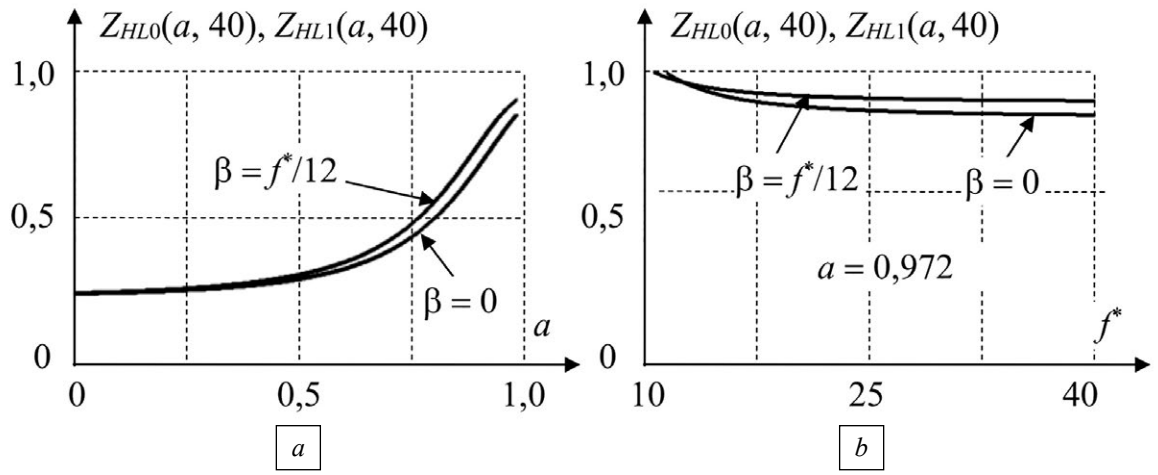


Рис. 2. Графики коэффициента эффективности алгоритмов с минимальным числом коммутаций ключей в функции: *a*) коэффициента амплитуды; *b*) относительной частоты модуляции

Fig. 2. Graphs of the efficiency coefficient of algorithms with a minimum number of key switches in the function: *a*) the amplitude coefficient; *b*) the relative frequency of modulation

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

системах преобразователь–электродвигатель. Дальнейшим направлением исследований может являться разработка оптимального по критерию эффективности алгоритма трехфазной ШИМ с учетом ограничения на потери мощности в электронных ключах.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hava A.M., Çetin N.O. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 26, N. 5. P. 1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
2. Mao X., Ayyanar R., Krishnamurthy H.K. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, № 4. P. 991–1001. doi: 10.1109/TPEL.2008.2009635
3. Климов В. Частотно-энергетические параметры шим-инверторов систем бесперебойного питания // Силовая электроника. 2009. № 22. С. 66–71. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009_4_66.pdf
4. Madhavi R., Harinath C. Investigation of various space vector pwm techniques for inverter // International Journal of Engineering Research and Management (IJERM). 2014. Vol. 1, N. 7. P. 162–165. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: https://www.ijerm.com/download_data/IJERM0110071.pdf
5. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Трехфазная синусоидальная модифицированная широтно-импульсная модуляция первого рода в автономных инверторах // Морской вестник. 2017. Т. 61, № 1. С. 69–72. Доступно по: http://morvest.ru/Full%20articles/MV61_to%20Web.pdf Дата обращения: 09.03.2024.
6. Гуськов В.О., Лавин А.В. Сравнительный анализ математических описаний и методов широтно-импульсной модуляции // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 74–81. doi: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81
7. Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Саушев А.В. Оптимальная широтно-импульсная модуляция в системе управления электроприводом // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 3. С. 463–471. doi: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-463-471

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

8. Hava A.M., Kerkman R.J., Lipo T.A. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm // IEEE Transactions on Industry applications. 1998. Vol. 34, N 5. P. 1059–1071. doi: https://doi.org/10.1109/28.720446
9. Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обобщенный анализ выходной энергии многофазных многоуровневых инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Электричество. 2016. № 4. С. 26–33. EDN: WALPQZ
10. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2011. № 5. С. 53–61. EDN: NRBWQP
11. Hava A.M., Çetin N.O. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Vol. 26, N.5. P. 1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
12. Tan G., Deng Q., Liu Z. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter // IEEE Transactions on power electronics. 2013. Vol. 29, N. 1. P. 386–395. doi: 10.1109/TPEL.2013.2248172
13. Nayeemuddin M., Rao C. Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive // Innovative Systems Design and Engineering (IJSR). 2016. Vol. 5. N. 7. P. 203-208. Дата обращения: 09.03.2024. Режим доступа: https://www.ijsr.net/archive/v5i7/NOV164785.pdf
14. Саушев А.В., Белоусов И.В., Бова Е.В., Румянцев А.Ю. Неполнофазные алгоритмы широтно-импульсной модуляции трехфазных напряжений в системах частотного управления электроприводами // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 231–246. doi: 10.17816/transsyst628299
15. Belousov I., Samoseiko V., Saushev A. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 363. P. 1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202236301025

REFERENCES

1. Hava AM, Çetin NO. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2010;26(5):1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
2. Mao X, Ayyanar R, Krishnamurthy HK. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2009;24(4):991–1001. doi: 10.1109/TPEL.2008.2009635
3. Klimov V. Chastotno-energeticheskie parametry shim-invertorov sistem bespereboinogo pitaniya. *Silovaya elektronika.* 2009;22:66–71. (In Russ.) [cited: 09.03.2023] Available from: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2009_4_66.pdf
4. Madhavi R, Harinath C. Investigation of various space vector pwm techniques for inverter. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM).* 2014;1(7):162–165. [cited: 09.03.2023] Available from: https://www.ijerm.com/download_data/IJERM0110071.pdf

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

5. Dmitriev BF, Galushin SYa, Likhomanov AM, Rozov AYu. Trekhfaznaya sinusoidal'naya modifitsirovannaya shirotno-impul'snaya modulyatsiya pervogo roda v avtonomnykh invertorakh. *Morskoi vestnik.* 2017;1(61):69–72. (In Russ.) [cited: 09.03.2023] Available from: http://morvest.ru/Full%20articles/MV-61_to%20Web.pdf
6. Gus'kov VO, Lavin AV. Sravnitel'nyi analiz matematicheskikh opisanii i metodov shirotno-impul'snoi modulyatsii. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya.* 2023;3:74–81. (In Russ.). doi: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81
7. Belousov IV, Samoseiko VF, Saushev AV. Optimal pulse width modulation in the electric drive control system. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S O Makarova.* 2022;14(3):463–71. (In Russ.). doi: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-463-471
8. Hava AM, Kerkman RJ, Lipo TA. A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm. *IEEE Transactions on Industry applications.* 1998;34(5): 1059–1071. doi: 10.1109/28.720446
9. Bakhovtsev IA, Zinoviev GS. Generalized analysis of the output energy of multiphase multilevel voltage inverters with pulse-width modulation. *Electricity.* 2016;4:26–33. [cited: 09.03.2023] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_26159419_45377023.pdf
10. Chaplygin EE, Khukhtikov SV. Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Electricity.* 2011;5:53–61. [cited: 09.03.2023] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_16225936_79381081.pdf
11. Hava AM, Çetin NO. A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2011;26(5):1385–1395. doi: 10.1109/TPEL.2010.2081689
12. Tan G, Deng Q, Liu Z. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter. *IEEE Transactions on power electronics.* 2013;29(1): 386–395. doi: 10.1109/TPEL.2013.2248172
13. Nayeemuddin M, Rao C. Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive. *Innovative Systems Design and Engineering (IJSR).* 2016;5(7):203–208. [cited: 09.03.2023] Available from: https://www.ijsr.net/archive/v5i7/NOV164785.pdf
14. Saushev AV, Belousov IV, Bova EV, Rumyantsev AY. Incomplete-phase algorithms for pulse-width modulation of three-phase voltages in frequency control systems of electric drives. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(2):231–246. doi: 10.17816/transsyst628299
15. Belousov IV, Samoseiko VF, Saushev AV. Evaluation of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation. *E3S Web of Conferences.* 2022;363:1–8. doi: 10.1051/e3sconf/202236301025

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Сведения об авторах:
Саушев Александр Васильевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;
eLibrary SPIN: 9692-8603; ORCID: 0000-0003-2657-9500;
E-mail: saushev@bk.ru
Белоусов Игорь Владимирович, доцент кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;
eLibrary SPIN: 9055-5945; ORCID: 0000-0002-9754-1318;
E-mail: igor5.spb@yandex.ru
Самосейко Вениамин Францевич, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;
eLibrary SPIN: 5813-4505;
E-mail: samoseyko@mail.ru

Information about the authors:
Aleksandr V. Saushev, Doctor of Sciences in Engineering, Head of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment Shore Installations;
eLibrary SPIN: 9692-8603; ORCID: 0000-0003-2657-9500;
E-mail: saushev@bk.ru
Igor V. Belousov, Associate Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations;
eLibrary SPIN: 9055-5945; ORCID: 0000-0002-9754-1318;
E-mail: igor5.spb@yandex.ru
Veniamin F. Samoseiko, Professor, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations;
eLibrary SPIN: 5813-4505;
E-mail: samoseyko@mail.ru

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

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

https://doi.org/10.17816/transsyst634127

© А.А. Лисов
Южно-Уральский государственный университет
(Челябинск, Россия)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Обоснование. В состав большинства современных автомобилей входит трансмиссия, состоящая из двигателя внутреннего сгорания (ДВС), передающего усилие через коробку передач к валу дифференциала, который передает крутящий момент на колёса. В случае с электротранспортом электродвигатели могут быть прикреплены непосредственно к колесам через понижающий редуктор, и при правильной системе управления автомобиль может передавать различный крутящий момент на колеса с каждой стороны автомобиля для реализации высокой управляемости. Такая система носит название – электронный дифференциал, его реализация может быть как очень простой, основанной на модели Аккермана-Жантана, которая не способна полноценно заменить простой механический дифференциал, так и основана на механизмах робастого управления с рысканьем по моменту. Последний метод требует довольно сложную систему управления и дорогостоящие датчики. Но есть и третий подход – использование нейронных сетей для управления скоростью электротранспорта.

Цель. Предоставить материалы и программное обеспечение для реализации электронного дифференциала, основанного на искусственных нейронных сетях, для расширения спектра решений проблемы управления несколькими приводами электроавтомобилей и иного электротранспорта.

Материалы и методы. Нейронная сеть учитывает совокупность аспектов, которые влияют или не влияют на работу электронного дифференциала путем подбора специальных коэффициентов – весов для нейронов внутри сети. В качестве основы для получения данных используются специальные карты трасс на основе переходной кривой.

Результаты. Результаты теста позволили получить точность прогнозирования равную 0,7273, среднеквадратичное отклонение для тренировочной выборки равное 0,064, а для тестовой выборки равное 0,065.

Заключение. Решение использовать нейросетевое управление электроприводом имеет право быть хорошим вариантом на замену иным алгоритмам. Кроме того, поскольку нейронные сети имеют большую гибкость и обучаемость, то на базе данного дифференциала можно также реализовать дополнительные функции помощи воителю, такие как ESP, ABS, круиз-контроль и др.

Ключевые слова: электромобили; электронный дифференциал; система управления; нейронные сети.

Как цитировать:
Лисов А.А. Разработка системы электронного дифференциала для электромобилей на основе нейросети глубокого обучения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 351–367. doi: 10.17816/transsyst634127

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov
South Ural State University
(Chelyabinsk, Russia)

DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES BASED ON DEEP NEURAL NETWORK

Background. Modern cars typically use a transmission system where an internal combustion engine transmits force through a gearbox to a differential shaft, which then transmits torque to the wheels. In electric vehicles, however, electric motors can be attached directly to the wheels through a reduction gearbox. With a right control system, these vehicles can apply different torque to the wheels on each side of the vehicle, significantly enhancing handling. This set-up is known as an electronic differential. Its implementation can vary from simple, using the Ackerman–Jeantand model, which cannot fully replace a simple mechanical differential, to complex systems employing robust control mechanisms with yaw torque. The latter method requires a rather complex control system and expensive sensors. A third –innovative approach involves using neural networks to control electric vehicle speeds.

Aim. The aim is to provide materials and software for implementing an electronic differential using artificial neural networks to expand the solutions available for controlling multiple electric derives in various electric vehicles.

Materials and Methods. The neural network considers multiple factors affecting the operation of electronic differential by selecting special coefficients, weights, to neurons within the network. As a basis for obtaining data, special route maps based on the transition curve will be used.

Results. Testing yielded a prediction accuracy of 0.7273, with a standard deviation of 0.064 for the training set and 0.065 for the testing set.

Conclusion. Employing neural networks for controlling electric drives is a promising alternative to traditional algorithms. Owing to their flexibility, these neural networks can also implement additional driver assistance functions, such as ESP, ABS, cruise control, etc.

Keywords: electric vehicles; electronic differential; control system; neural networks.

To cite this article:
Lisov AA. Development of an electronic differential system for electric vehicles based on deep neural network. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):351–367. doi: 10.17816/transsyst634127

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается устойчивая тенденция к развитию электротранспорта по всему миру. Обычные автомобили в своём составе имеют трансмиссию, состоящую из двигателя внутреннего сгорания (ДВС), передающего усилие через коробку передач к валу дифференциала, который, который в свою очередь, передает крутящий момент на колёса. В случае с электротранспортом электродвигатели могут быть прикреплены непосредственно к колесам через понижающий редуктор, и, при правильной системе управления, автомобиль может передавать различные крутящие моменты на колеса с каждой стороны автомобиля для реализации высокой управляемости [1], либо использовать классическую схему с одним тяговым двигателем и дифференциалом.

Реализация электронного дифференциала может быть разнообразной и иметь несколько вариантов конфигураций [2]. Однако на практике, следует выделить 2 наиболее оптимальных варианта: полностью полноприводный автомобиль с 4-мя независимыми двигателями и два независимых двигателя сзади. В данной статье внимание будет уделено конфигурации автомобиля с двумя независимыми двигателями сзади, структурная схема которого изображена на Рис. 1.

Такая конфигурация позволяет достичь хороших динамических характеристик и управляемости и сложной системы подвески (независимая и полунезависимая) для распределения крутящего момента как это приходится делать в случае применения переднего привода [3].

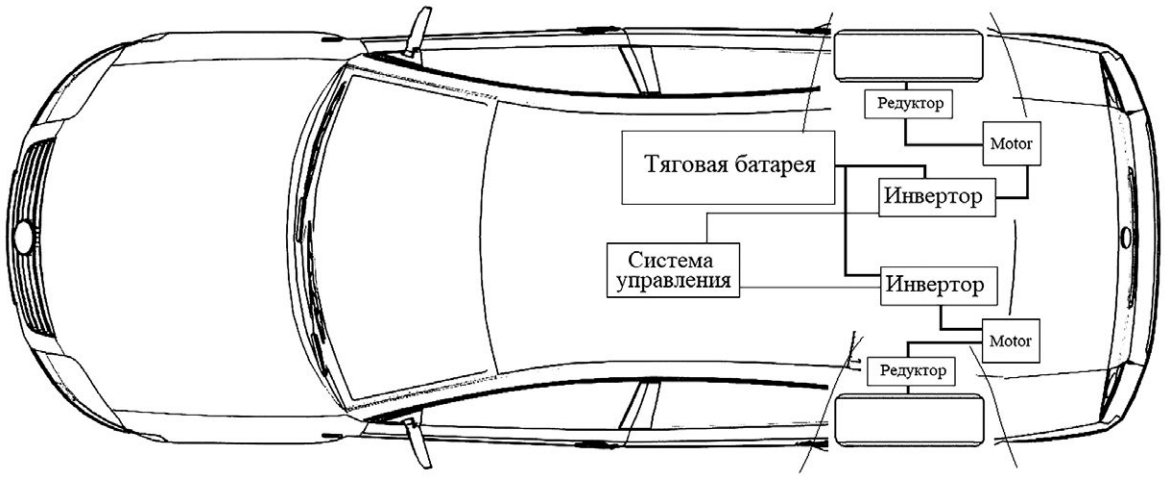


Рис. 1. Конфигурация трансмиссии с 2-мя независимыми двигателями сзади

Fig. 1. Transmission configuration with 2 independent motors at the rear

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Наиболее часто используемый вид электронного дифференциала – модель Аккермана-Жантана [4]. Эта модель была первоначально создана Рудольфом Акерманом в XIX веке и служит для установления связи между скоростями вращения внутреннего и внешнего колес автомобиля во время маневров. Стоит отметить, что указанная модель при этом не учитывает множество аспектов реального движения автомобиля на значительной скорости (вращение вокруг своей оси, поведение шин, состояние дорожного покрытия и т.д.) [5]. Для решения поставленной задачи был разработан, например, метод робастного управления [6], основанной на двухстепенной схеме прямого управления моментом рыскания. Тем не менее, модель в этом случае получается довольно громоздкая и требует наличия дорогостоящих датчиков и систем контроля. Однако, существует ещё один известный способ – использование нейронных сетей (НС, NN), который впервые был предложен в [7]. Вместе с тем, указанная концепция не получила должного развития из-за необходимости придумать уникальный метод для обучения НС, что было успешно реализовано в рамках диссертационной работы и показано в данном исследовании.

НС в виду своей гибкости может учитывать все ранее перечисленные аспекты, влияющие на характер движения транспортного средства и при этом она не будет использовать сложные алгоритмы и формулы как алгоритмах робастного управления. Сейчас концепция нейронных сетей стала активной областью исследований в области силовой электроники и приводов двигателей. Из-за их адаптивных способностей в процессе обучения, применение для идентификации систем и динамики управления стало многообещающей альтернативой управлению процессами [8, 9]. НС могут применяться для управления и идентификации нелинейных систем, поскольку они аппроксимируют любую желаемую степень точности с помощью широкого спектра нелинейных моделей [10, 11].

В настоящей статье предлагается дальнейшее развитие и исследование данного подхода управления тяговым электроприводом электроавтомобилей. Развитие представляет из себя разработку универсальной системы сбора и обработки информации с датчиков для последующего обучения нейронной сети, которые ранее не рассматривались в иных исследованиях.

1. ПРИНЦИП СБОРА ДАННЫХ

Электронная система дифференциального управления на основе нейронной сети с алгоритмом обратного распространения ошибки

Received: 08.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 08.07.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

является системой, где результатом работы является предсказание, основанное на обучении сети на результатах эксперимента. Нейронная сеть учитывает совокупность аспектов, которые влияют или не влияют на работу электронного дифференциала путём подбора специальных коэффициентов – весов для нейронов внутри сети.

На малых скоростях для определения траектории движения автомобиля широко используется ранее упомянутая модель Аккермана и Жеантана. Однако, как уже говорилось у данной модели есть ограничение – она не учитывает влияние центробежной силы, характер поведения шин, погодные условия и привычки водителя. Все эти аспекты можно учесть с помощью НС, что наглядно было подтверждено серией исследований [12–16].

Вышеупомянутые статьи были доработаны до более применительного на практике вида, путём разработки ПО для обучения НС на экспериментальных данных, ПО для сбора и обработки информации с датчиков посредством ПК и микроконтроллера, а также ряда программ для исследования влияния гиперпараметров на конечную точность прогнозирования сети и иных вспомогательных скриптов. Кроме того, была разработана функциональная схема электропривода, являющаяся основой для принципиальной схемы модели электромобиля для сбора данных. Стоит отметить, что для управления скоростью электропривода также можно увидеть применение НС [17–19]. В рамках данной статьи будет рассмотрен общий принцип построения системы для сбора показаний датчиков скорости, гироскопа, акселерометра и угла поворота рулевой рейки, а также результаты тестирования точности прогнозирования разработанной нейронной сети.

НС получает значение скорости из линейной модели, анализирует внешние параметры и корректирует скорость привода таким образом, чтобы достичь максимальной эффективности, общая структура электронной дифференциальной системы для сбора информации представлена на Рис. 2.

Создание переходных кривых как основы для получения датасета

В качестве основы для получения данных будут использованы специальные карты трасс на основе переходной кривой. Переходная кривая – это плавное сглаживание перехода между двумя прямыми участками дороги или железной дороги и изгибами. Она применяется для снижения резкости изменений направления движения

Received: 08.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 08.07.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

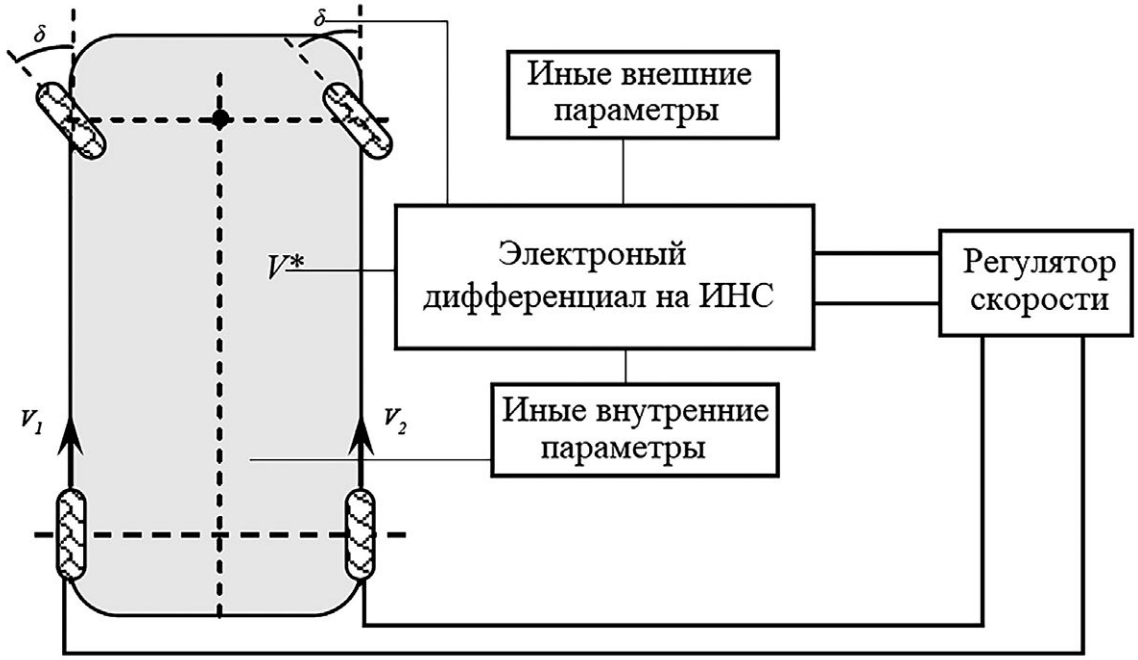


Рис. 2. Структура электронной дифференциальной системы **с использованием** нейронной сети

Fig. 2. Structure of an electronic differential system using a neural network

и обеспечения комфортного перемещения транспортных средств и пассажиров.

Переходные кривые обычно имеют форму дуги окружности или спиральной линии, которые соединяют прямые участки с изгибами. Эти кривые строятся таким образом, чтобы обеспечить плавный переход от прямолинейного движения к движению по изгибу без резких ускорений или замедлений. Использование переходных кривых помогает уменьшить риски аварийного торможения или ускорения на изломах дороги, а также повысить безопасность и комфортность движения на дорогах и железнодорожных путях.

Поскольку данные кривые используются при построении поворотов на реальных дорогах целесообразно использовать эти построения и формулы и для модели автомобиля в соответствующем масштабе. Построение круговой кривой показано на Рис. 3. Сокращения на нём имеют следующие определения: ВСТ / ЕСТ – beginning / end of the curve turn; ВСС / ЕСС – beginning / end of a circular curve.

На Рис. 3 представлены следующие геометрические элементы закругления: угол – α, радиус – R, кривая – К, тангенс – Т, биссектриса – Б, домер – T_0 и длина переходных кривых L. Домер используется для

Received: 08.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 08.07.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

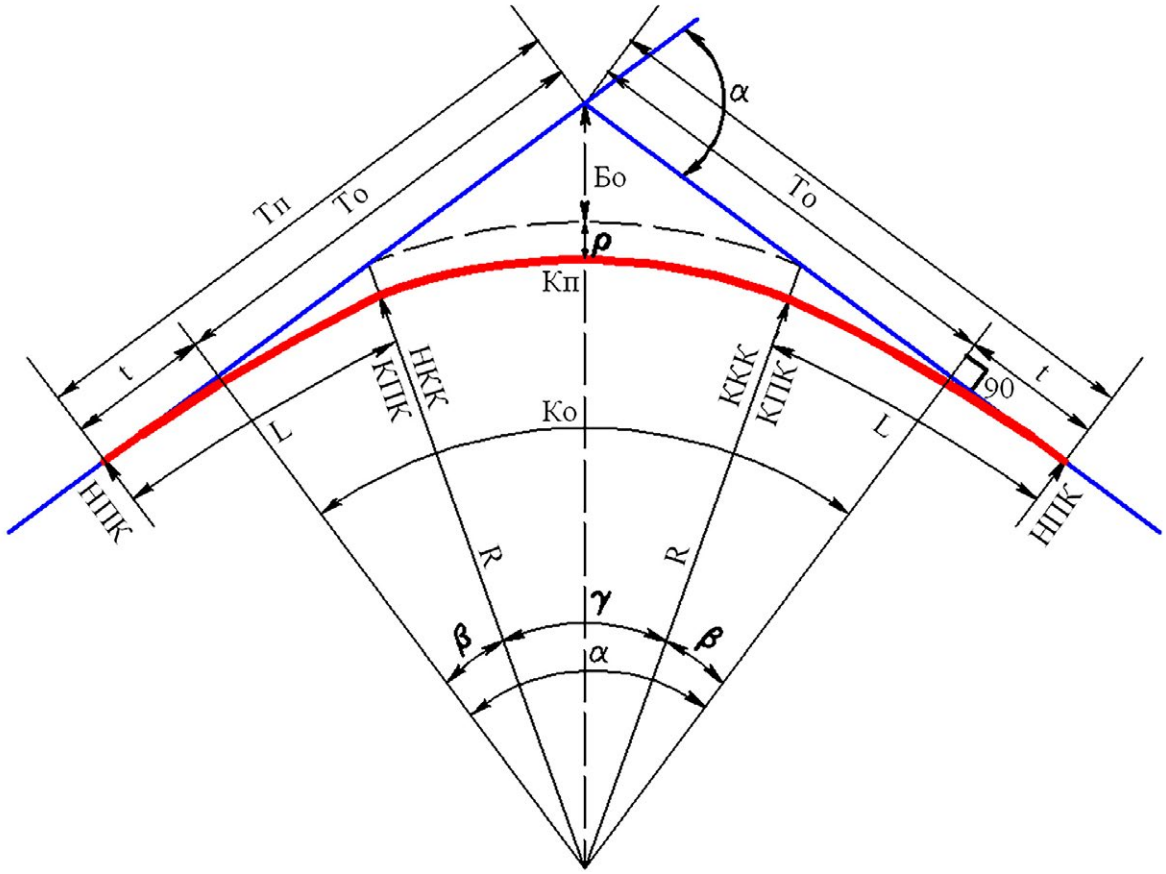


Рис. 3. Схема круговой кривой

Fig. 3. Circular curve diagram

обозначения части переходной кривой, которая находится между прямым участком дороги или железной дороги и самой кривой. Домер является частью переходной кривой, где происходит постепенное изменение радиуса кривизны от значения, характерного для прямолинейного участка, к значению, соответствующему кривизне изгиба.

Иными словами, домер – это участок переходной кривой, на котором радиус кривизны плавно изменяется от нуля (для прямого участка) до радиуса кривизны кривой. Этот участок обеспечивает плавный переход между прямолинейным и криволинейным движением, что помогает уменьшить воздействие центробежных сил на транспортное средство и обеспечивает более комфортное и безопасное движение.

Расстояние от вершины угла до начала кривой (Т) вычисляется следующим образом:

$$T = tg\frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

Received: 08.07.2024
Поступил: 08.07.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

Расстояние от начала кривой до конца кривой (К) можно вычислить по формуле:

$$K = \frac{\pi R \cdot \alpha}{180^0} \tag{2}$$

Расстояние от вершины угла поворота до середины кривой (Б) рассчитывается согласно:

$$Б = R \cdot \left(\sec\frac{\alpha}{2} - 1 \right) = R \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 \right) \tag{3}$$

Домер (T_0) вычисляется в соответствии с формулой:

$$T = \cdot T - K \tag{4}$$

Длина переходных кривых зависит от R и может быть определена по формуле:

$$L = \frac{\vartheta^3}{47 \cdot R \cdot \gamma} \tag{5}$$

где υ – скорость транспортрного средства; а γ – величина нарастания центробежного ускорения (обычно принимается в диапазоне [0,3;1] м/с^2).

2. СОЗДАНИЕ ДАТАСЕТА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НС

На Рис. 4 приведена схема вычисления отклонения для обучения нейронной сети для электронного дифференциала. Принцип состоит в том, чтобы заранее расчертить на карте поворотов идеальные кривые (красная траектория на Рис. 4), к которым нужно стремиться при управлении приводами при помощи НС. При проведении экспериментов на тяговые приводы подаются различные вариации скорости вращения, чтобы получить иную траекторию движения (синяя на Рис. 4), данные с датчиков и самое главное величину отклонения от идеальной траектории в градусах, именно эти данные станут основой для датасета. При штатной работе электронной дифференциальной системы отклонение будет автоматически задаваться нулём.

Сбор данных происходит в полуавтоматическом режиме – оператор задает момент для начала и окончания процесса, а также дает команду на экспорт данных в excel для дальнейшей обработки. Датасет состоит

Received: 08.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 08.07.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

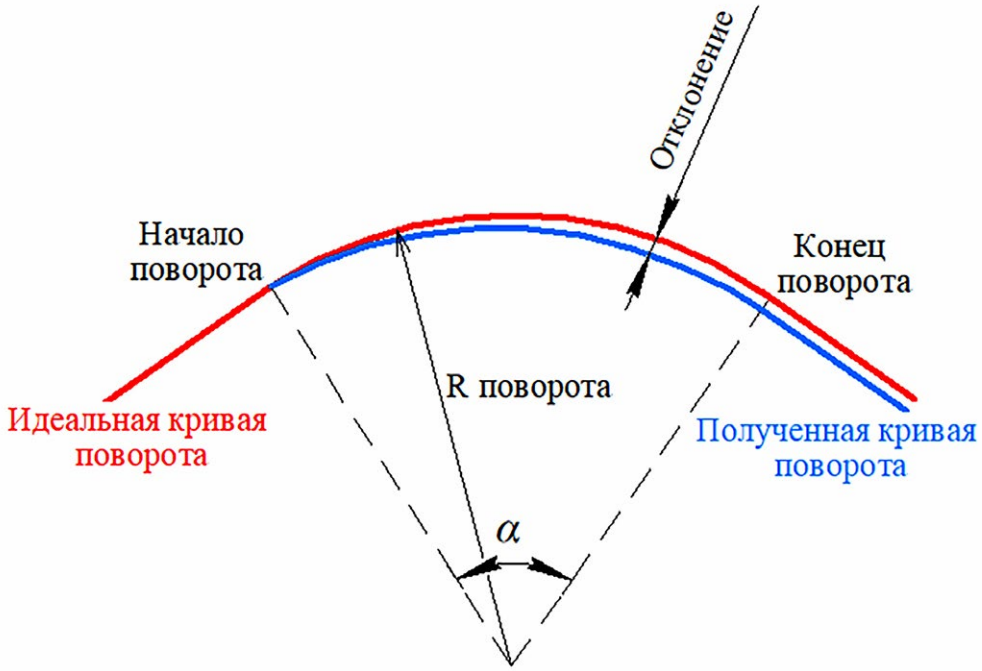


Рис. 4. Принцип вычисления отклонения для тренировки ИНС

Fig. 4. Principle of calculating the deviation for ANN training

из 217 отфильтрованных замеров с датчиков. После экспорта данные масштабируются в диапазон [-1;1] для более корректного вычисления градиентов при обучении НС. Все данные будут опубликованы на GitHub автора работы (пользователь: AnLiMan, репозиторий: Electronics_ Differential_System).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как говорилось ранее, методика сбора данных для нейросети предполагает наличие специальной карты идеальных кривых вращения. На Рис. 6 показано фото этой карты поворотов. Карта выполнена на листах миллиметровой масштабно-координатной бумаге для упрощения расчетов отклонений. Модель электромобиля (Рис. 7) движется по этому полю и отмечает пройденную траекторию ручкой со стираемыми чернилами (можно и карандашом), также во время движения на компьютер поступают данные с датчиков.

На Рис. 6 приняты следующие обозначения: 1 – Отверстие для пишущего устройства для записи траектории; 2 – Передние тяги для поворота колёс; 3 – BMS тяговой батареи; 4 – Тяговая батарея; 5 – Bluetooth-модуль для связи с ПК; 6 – Спроектированный механизм

Received: 08.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 08.07.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

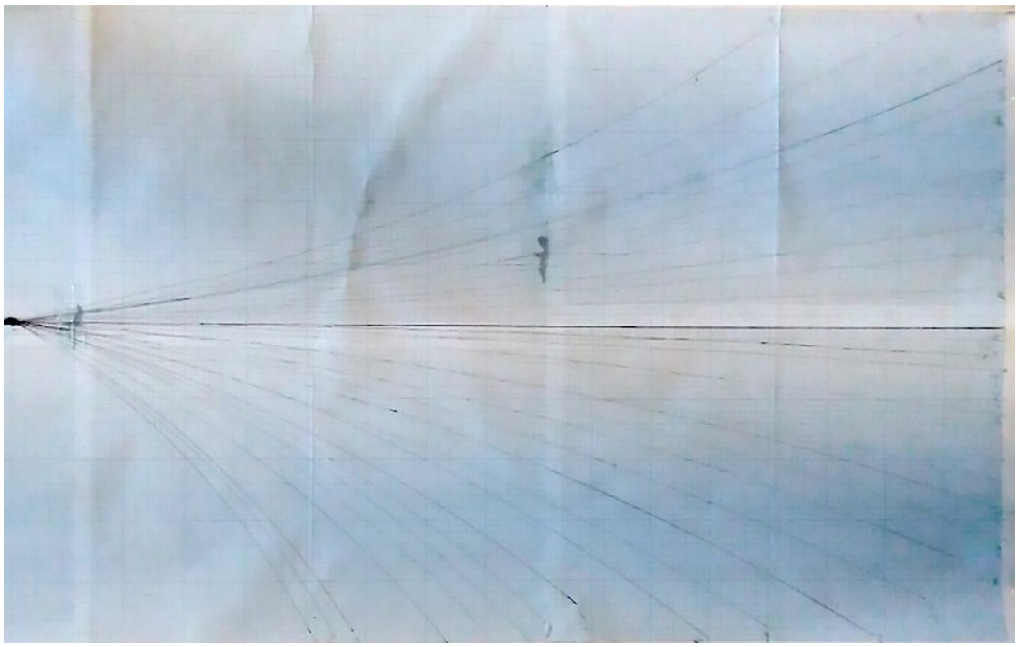


Рис. 5. Карты поворотов для сбора данных

Fig. 5. Maps of turns for data collection

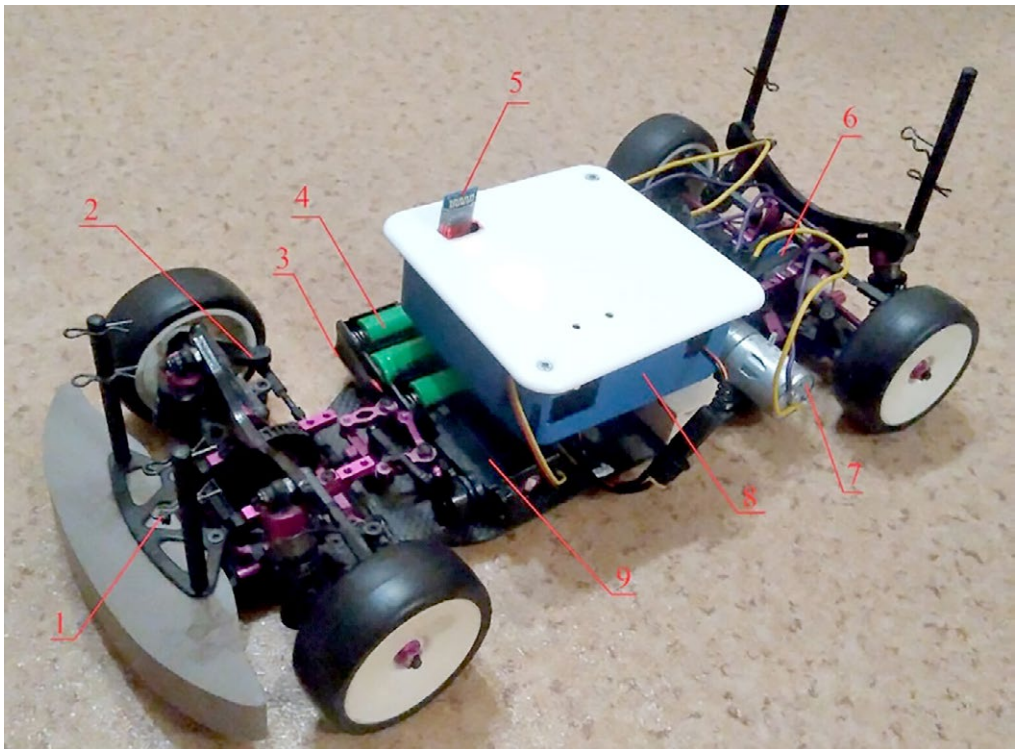


Рис. 6. Модель электромобиля в сборе

Fig. 6. Complete electric vehicle model

Received: 08.07.2024
Поступил: 08.07.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

передачи крутящего момента; 7 – Тяговые двигатели; 8 – Корпус системы управления с макетной платой внутри; 9 – Сервопривод для поворота тяг.

Графики процесса обучения функции потерь (Рис. 7) и точности прогнозирования (Рис. 8) приведены ниже. Анализ графических результатов позволяет сделать вывод о неплохой точности прогноза даже при условии небольшого количества исходных данных для обучения, что позволило получить следующие точность прогнозирования равную 0,7273, среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square Error, RMSE) для тренировочной выборки равное 0,064, а для тестовой выборки равное 0,065.

Среднее время на расчёт составило 0,10513±5% секунд при задании отдельными массивами (пакетами) с каждым новым вызовом функции предсказания. С единоразовым вывозом функции предсказания для тестовой выборки из 22 пакетов составило 0,02776±5% секунды.

На Рис. 9 приведены результаты теста точности прогнозирования НС на тестовой выборке из 22 пакетов. Синяя линия (V_1) истинное значение из датасета, а зеленая линия предсказанное НС значение V_1. Оранжевая линия V_2 реальное значение, а красная – предсказанное значение V_2. Как видно из Рис. 9. НС показывает неплохие результаты даже при столь небольшом размере датасета, т.к. по крайней мере предсказания стремятся к своим рефференсным значениям.

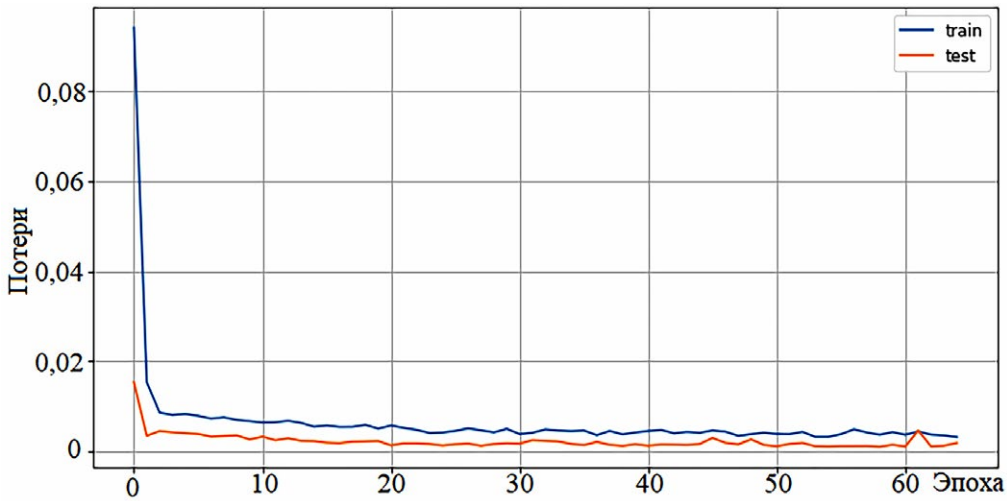


Рис. 7. График потерь (loss) в процессе обучения ИНС

Fig. 7. Graph of losses during ANN training

Received: 08.07.2024
Поступил: 08.07.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

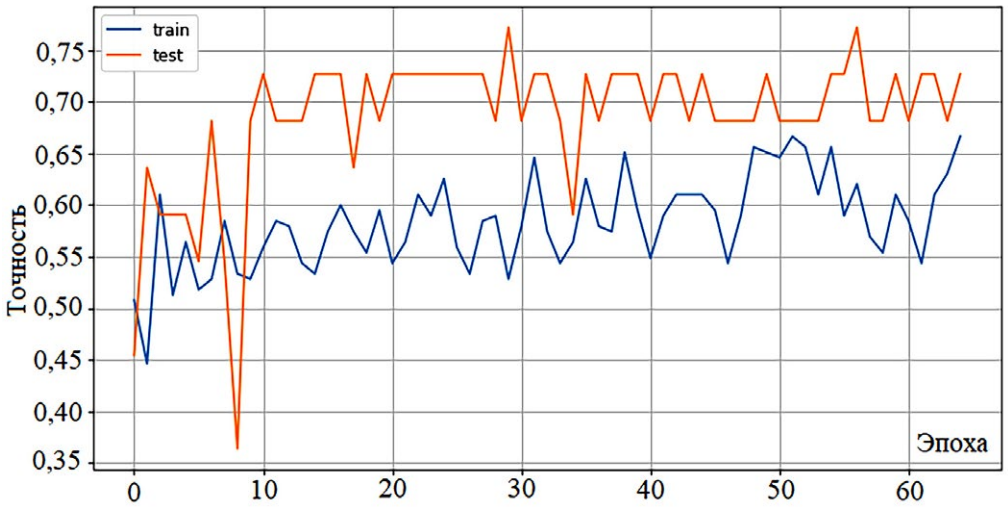


Рис. 8. График точности прогнозирования (accuracy) в процессе обучения

Fig. 8. Graph of the forecast accuracy during training

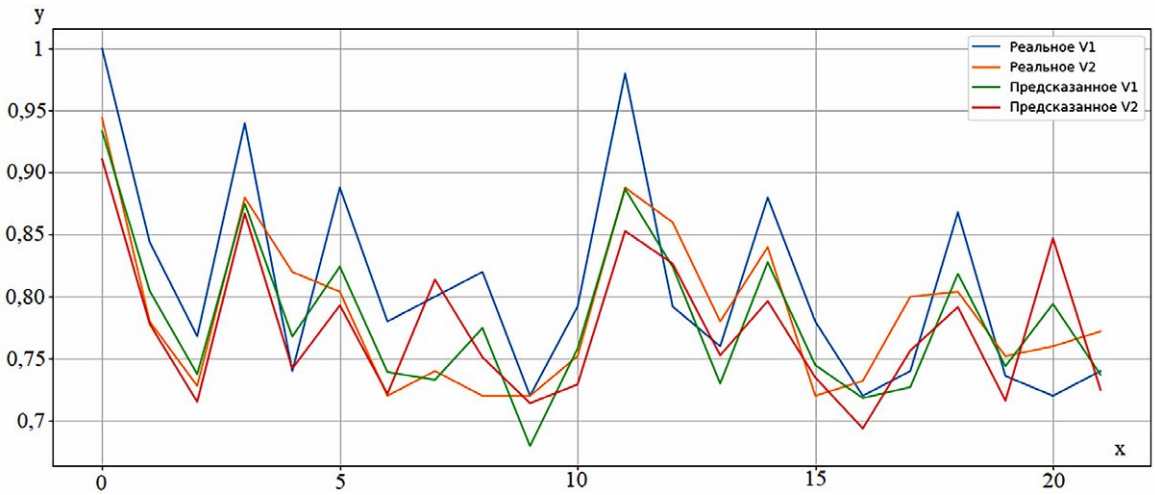


Рис. 9. Графики прогноза модели нейронной сети на тестовой

Fig. 9. Prediction graphs of the neural network model on the test sample

ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках данной работы производилась разработка тестовой модели электромобиля для проверки гипотезы и построения теории нейросетевого управления электроприводом для реализации электронно-дифференциальной системы. Как выяснилось в результате, данное решение имеет право быть хорошим вариантом на замену иным алгоритмам. Также, поскольку НС имеют большую гибкость и обучаемость, то на базе данного дифференциала можно также реализовать дополнительные функции помощи воителю, такие как ESP, ABS, круиз-контроль и др. [20–22].

Received: 08.07.2024
Поступил: 08.07.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

В качестве метода отслеживания отклонения от идеальной траектории можно использовать закреплённую камеру над линией движения. Само отклонение можно будет вычислить по времени, когда проводились замеры с датчиков и при помощи алгоритмов определения расстояния, либо простым переводом пикселей в миллиметры, что существенно ускорит процесс снятия данных.

В статье была рассмотрена концепция компоновки с двумя ведущими двигателями сзади автомобиля. Однако, остается не закрытым вопрос получения модели для ведущих колёс спереди и полноприводного решения. Базово, предложенный алгоритм и код никак не меняется, необходимо лишь расширить число параметров скорости для полноприводной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика сбора данных для нейронной сети на основе специальной карты идеальных кривых поворота показала себя как рабочий инструмент для целей обучения ИНС электронного дифференциала. Также стоит отметить, что код программы и схема работы, в целом, подразумевает как расширение, так и сужение количества измеряемых параметров без значительных изменений исходного кода, что положительно влияет на универсальность решения.

Из графиков процесса обучения функции потерь и точности прогнозирования можно сделать вывод о неплохой точности прогноза даже при условии небольшого количества исходных данных для обучения, что позволило получить следующие точность прогнозирования равную 0,7273, среднеквадратичное отклонение для тренировочной выборки равное 0,064, а для тестовой выборки равное 0,065.

РЕКОМЕНДАЦИЯ

Доктор технических наук, профессор кафедры электропривода, механотроники и электродинамики Южно-Уральского государственного университета Александр Григорьевич Возьмилов рекомендует данную статью к публикации.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.
The author declares that this article does not contain any studies involving human subjects.

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Khan-Ngern W., Keyoonwong W. Embedded electronic differential system on two brushless DC motor drives for electric vehicle steering control. In: 2018 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology & International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (ICESIT-ICICTES). IEEE, 2018. doi: 10.1109/ICESIT-ICICTES.2018.8442060
2. Meier T., Rinderknecht S., Fietzek R. Electric power train configurations with appropriate transmission systems // SAE Technical Paper. 2011. doi: https://doi.org/10.4271/2011-01-0942
3. Yıldırım M., Öksüztepe E., Tanyeri B., Kürüm H. Electronic differential system for an electric vehicle with in-wheel motor. In: 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, 2015. P. 1048–1052. doi: 10.1109/ELECO.2015.7394567
4. Chen S., Yin G., Jin X. Study on the active steering system with direct yaw-moment control for electric vehicle with electric motored wheels. In: 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016. P. 8945–8950. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554785
5. Hu J.S., Wang Y., Fujimoto H., Hori Y. Robust yaw stability control for in-wheel motor electric vehicles // ASME Transactions On Mechatronics. 2017. Vol. 22, N. 3. P. 1360–1370. doi: 10.1109/TMECH.2017.2677998
6. Nam K., Oh S., Hori Y. Robust yaw stability control for electric vehicles based on active steering control. In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2010. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729202
7. Bose B.K. Neural network applications in power electronics and motor drives – An introduction and perspective // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 1. P. 14–33. doi: 10.1109/TIE.2006.888683
8. Лисов А.А., Кулганатов А.З., Панишев С.А. Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверхточных нейронных сетей // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 95–107. doi: 10.17816/transsyst20239195-107
9. Vozmilov A., Andreev L., Lisov A. Development of an algorithm for the program to recognize defects on the surface of hot-rolled metal. In: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022. P. 1004–1008. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787116
10. Cirrincione M, Pucci M, Cirrincione G, Capolino GA. Sensorless control of induction machines by a new neural algorithm: The TLS EXIN neuron // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 1. P. 127–49. doi: 10.1109/TIE.2006.888774
11. Карандеев Д.Ю., Энгель Е.А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 5(30). С. 124–131. doi: 10.15862/91TVN515
12. Zhang W., Liu Z., Chen Q. Electronic differential system based on adaptive SMC combined with QP for 4WID electric vehicles // World Electric Vehicle Journal. 2021. Vol. 12, N. 3. P. 126–132. doi: 10.3390/wevj12030126

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

13. Haddoun A., Benbouzid M.E., Diallo D., et al. Analysis, modeling and neural network traction control of an electric vehicle without differential gears. In: IEEE International Electric Machines & Drives Conference. IEEE, 2007. P. 854–859. doi: 10.1109/IEMDC.2007.382780
14. J Lee J.S., Ryoo Y.J., Lim Y.C., et al. A neural network model of electric differential system for electric vehicle. In: 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON, 2000. P. 83-88. doi: 10.1109/IECON.2000.973130
15. Rubaai A., Castro-Sitiriche M.J., Garuba M., Burge L. Implementation of artificial neural network-based tracking controller for high-performance stepper motor drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 1. P. 218–227. doi: 10.1109/TIE.2006.888785
16. Jung S., su Kim S. Hardware implementation of a real-time neural network controller with a DSP and an FPGA for nonlinear systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 1. P. 265–271. doi: 10.1109/TIE.2006.888791
17. Lin F.J., Huang P.K., Chou W.D. Recurrent-fuzzy-neural-network-controlled linear induction motor servo drive using genetic algorithms // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 3. P. 1449–1461. doi: 10.1109/TIE.2007.892256
18. Lin C.M, Hsu C.F. Recurrent-neural-network-based adaptive-backstepping control for induction servomotors // IEEE Transactions on industrial electronics. 2005. Vol. 52, N. 6. P. 1677–1684. doi: 10.1109/TIE.2005.858704
19. Wlas M., Krzeminski Z., Guzinski J., et al. Artificial-neural-network-based sensorless nonlinear control of induction motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, N. 3. P. 520–528. doi: 10.1109/TEC.2005.847984
20. Yousefzadeh M., Azadi S., Soltani A. Road profile estimation using neural network algorithm // Journal of mechanical science and technology. 2010. Vol. 24. P. 743–754. doi: 10.1007/s12206-010-0113-1
21. Šabanovič E., Žuraulis V., Prentkovskis O., Skrickij V. Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation // Sensors. 2020. Vol. 20, N. 3. P. 612. doi: 10.3390/s20030612
22. Yi T., Xin Z., Liang Z., Xinn Z. Intelligent energy management based on driving cycle identification using fuzzy neural network. Second International Symposium on Computational Intelligence and Design. IEEE, 2009. P. 501–504. doi: 10.1109/ISCID.2009.271

REFERENCES

1. Khan-Ngern W, Keyoonwong W. Embedded electronic differential system on two brushless DC motor drives for electric vehicle steering control. In: *2018 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology & International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (ICESIT-ICICTES).* IEEE; 2018. doi: 10.1109/ICESIT-ICICTES.2018.8442060
2. Meier T, Rinderknecht S, Fietzek R. Electric power train configurations with appropriate transmission systems. *SAE Technical Paper.* 2011. doi: https://doi.org/10.4271/2011-01-0942

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

3. Yıldırım M, Öksüztepe E, Tanyeri B, Kürüm H. Electronic differential system for an electric vehicle with in-wheel motor. In: *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO).* IEEE; 2015;1048–1052. doi: 10.1109/ELECO.2015.7394567
4. Chen S, Yin G, Jin X. Study on the active steering system with direct yaw-moment control for electric vehicle with electric motored wheels. In: *35th Chinese Control Conference (CCC).* IEEE; 2016:8945–8950. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554785
5. Hu J.S, Wang Y, Fujimoto H, Hori Y. Robust yaw stability control for in-wheel motor electric vehicles. *ASME Transactions On Mechatronics.* 2017;22(3):1360–1370. doi: 10.1109/TMECH.2017.2677998
6. Nam K, Oh S, Hori Y. Robust yaw stability control for electric vehicles based on active steering control. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.* IEEE; 2010:1–5. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729202
7. Bose BK. Neural network applications in power electronics and motor drives – An introduction and perspective. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007; 54(1):14–33. doi: 10.1109/TIE.2006.888683
8. Lisov AA, Kulganatov AZ, Panishev SA. Using convolutional neural networks for acoustic based emergency vehicle detection. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(1):95–107 (in Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239195-107
9. Vozmilov A, Andreev L, Lisov A. Development of an algorithm for the program to recognize defects on the surface of hot-rolled metal. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).* 2022:1004–1008. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787116
10. Cirrincione M, Pucci M, Cirrincione G, Capolino GA. Sensorless control of induction machines by a new neural algorithm: The TLS EXIN neuron. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007;54(1):127–49. doi: 10.1109/TIE.2006.888774
11. Karandeev DJ, Engel EA. Direct torque control of induction motor using adaptive neurocontroller under conditions of uncertainty. *Online journal "Science Studies".* 2015;5(30):124–131. doi: 10.15862/91TVN515
12. Zhang W, Liu Z, Chen Q. Electronic differential system based on adaptive SMC combined with QP for 4WID electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal.* 2021;12(3):126–132. doi: 10.3390/wevj12030126
13. Haddoun A, Benbouzid ME, Diallo D, et al. Analysis, modeling and neural network traction control of an electric vehicle without differential gears. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference.* IEEE; 2007:854–859. doi: 10.1109/IEMDC.2007.382780
14. J Lee JS, Ryoo YJ, Lim YC, et al. A neural network model of electric differential system for electric vehicle. In: *26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* IECON IEEE; 2000:83–88. doi: 10.1109/IECON.2000.973130
15. Rubaai A, Castro-Sitiriche MJ, Garuba M, Burge L. Implementation of artificial neural network-based tracking controller for high-performance stepper motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007;54(1):218–27. doi: 10.1109/TIE.2006.888785

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

16. Jung S, su Kim S. Hardware implementation of a real-time neural network controller with a DSP and an FPGA for nonlinear systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007;54(1):265–71. doi: 10.1109/TIE.2006.888791
17. Lin FJ, Huang PK, Chou WD. Recurrent-fuzzy-neural-network-controlled linear induction motor servo drive using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007;54(3):1449–1461. doi: 10.1109/TIE.2007.892256
18. Lin CM, Hsu CF. Recurrent-neural-network-based adaptive-backstepping control for induction servomotors. *IEEE Transactions on industrial electronics.* 2005;5;52(6):1677–1684. doi: 10.1109/TIE.2005.858704
19. Wlas M, Krzeminski Z, Guzinski J, et al. Artificial-neural-network-based sensorless nonlinear control of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 2005;20(3):520–8. doi: 10.1109/TEC.2005.847984
20. Yousefzadeh M, Azadi S, Soltani A. Road profile estimation using neural network algorithm. *Journal of mechanical science and technology.* 2010:24:743–54. doi: 10.1007/s12206-010-0113-1
21. Šabanovič E, Žuraulis V, Prentkovskis O, Skrickij V. Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation. *Sensors.* 2020;20(3):612. doi: 10.3390/s20030612
22. Yi T, Xin Z, Liang Z, Xinn Z. Intelligent energy management based on driving cycle identification using fuzzy neural network. *Second International Symposium on Computational Intelligence and Design* 2009:501–504. doi: 10.1109/ISCID.2009.271

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

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

Received: 08.07.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 08.07.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

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

https://doi.org/10.17816/transsyst635508

© А.Э. Аухадеев
Казанский государственный энергетический университет
(Казань, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ОБОСНОВАНИИ АЛГОРИТМОВ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Обоснование. Исследования современного состояния и тенденций развития городского наземного общественного электрического транспорта в России показывают, что данная отрасль нуждается в прорывных инновационных технологиях в области проектирования и эксплуатации новых типов подвижного состава, тягового электрооборудования и перспективных видов электрической тяги. При этом особое внимание необходимо уделять вопросам построения систем автономного управления электрическим транспортом на основе технологий искусственного интеллекта.

Цель. Исследовать особенности применения нейронных сетей для обоснования алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования городского наземного рельсового электротранспорта.

Материалы и методы. Использовались результаты исследования режимов работы тягового электрооборудования подвижного состава, которые были получены на основе компьютерного и натурного эксперимента для реальных условий эксплуатации городского электрического транспорта, при различных алгоритмах управления. Анализ полученных данных, проведенный с использованием методов теории вероятности и математической статистики, позволил выявить направленность и силу корреляционных связей между эксплуатационными и энергетическими параметрами движения подвижного состава и режимами работы его тягового электрооборудования.

Результаты. Выявленные корреляционные зависимости использовались для обоснования эффективной архитектуры (размер и сложность) нейронных сетей, а также состава их обучающих выборок, на основании которых разработан оригинальный упрощенный алгоритм определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования при движении транспортного средства на заданном участке пути.

Заключение. Проведенные исследования выявили, что применение для вычисления параметров алгоритмов эффективного управления режимами работы тягового электрооборудования городского электрического транспорта на основе комплекса “простых” нейронных сетей может обеспечить более высокую скорость при достаточной точности, чем использование сложных нейросетевых моделей. Результаты работы могут представлять интерес для разработчиков систем интеллектуального управления трамвайным транспортом.

Ключевые слова: городской электрический транспорт; автономное управление; трамвайный транспорт; тяговое электрооборудование; алгоритмы эффективного управления, нейронная сеть прямого распространения; многослойный персептрон.

Как цитировать:
Аухадеев А.Э. Применение технологий искусственного интеллекта при обосновании алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования городского электротранспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 368–389. doi: 10.17816/transsyst635508

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A. E. Aukhadeev
Kazan State Power Engineering University
(Kazan, Russia)

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES AT SUBSTANTIATION OF EFFECTIVE CONTROL ALGORITHMS FOR THE ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION ELECTRICAL EQUIPMENT

Background. Studies on the current state and development trends of urban ground public electric transportation in Russia highlight the urgent need for innovative technologies. These innovations should focus on designing and operating new types of rolling stock, traction electrical equipment, and promising types of electric traction. At the same time, special attention should be paid to building autonomous control systems for electric transportation using artificial intelligence technologies.

Aim. This study aims to explore the application of neural networks to develop algorithms for effectively controlling the electrical engineering complex of traction electrical equipment in urban ground rail electric transport.

Materials and Methods. The research utilized data from studies on the traction electrical equipment modes of rolling stock. These studies were conducted through both computer simulations and field experiments under real operating conditions of urban electric transport using different control algorithms. By applying probability theory and mathematical statistics, the analysis identified the correlations between operational and energy parameters of rolling stock movement and the operational mode of its traction electrical equipment.

Results. The identified correlation dependencies informed the design of an effective network architecture, including its size and complexity, as well as the composition of their training samples. This led to the development of an original, simplified algorithm for determining effective control parameters for the electrical complex of traction electrical equipment during the movement of a vehicle on a given section of track.

Conclusion. The research concluded that using “simple” neural networks for calculating the parameters of effective control of traction electrical equipment operation modes in urban electric transport provides higher speed and sufficient accuracy compared to complex neural network models. These results are valuable for developers of intelligent control systems for streetcar transportation.

Keywords: urban electric transport; autonomous control; streetcar transport; traction electrical equipment; effective control algorithms; feed forward neural network; multilayer perceptron.

To cite this article:
Aukhadeev AE. Application of artificial intelligence technologies at substantiation of effective control algorithms for the electrical engineering complex of urban electric transport traction electrical equipment. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):368–389. doi: 10.17816/transsyst635508

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

С 2023 г. Правительство РФ совместно с Министерством транспорта реализуют программу Комплексного развития городского электрического транспорта (ГЭТ). Работа идет в рамках федерального проекта «Развитие общественного транспорта» национального проекта «Безопасные качественные дороги». На модернизацию ГЭТ до 2030 г. планируется направить более 310 млрд рублей. В рамках программы предусматривается строительство и реконструкция 620 км трамвайных путей, 11 депо и 97 тяговых подстанций, поставка 646 трамвайных вагонов, не менее 284 электробусов, установка не менее 100 зарядных станций и др. [1].

Инициативы Правительства РФ, направленные на развитие городского электрического транспорта, полностью соответствует мировым тенденциям «возрождения» в больших городских агломерациях систем общественного транспорта на основе электрической тяги.

Активная государственная поддержка направлена, в первую очередь, на стимулирование отечественного производителя, что обеспечит снижение импорта готовых технических решений и предотвращение отставания технологического уровня производства от зарубежных аналогов [2]. Для модернизации и развития существующей системы общественного ГЭТ необходимо производство перспективных моделей контактного ГЭТ с новым тяговым электрооборудованием (ТЭО), разработанных с учетом требований к повышению комфортности (плавный пуск и высокие динамические характеристики, повышенная автономность хода, низкопольность транспортного средства (ТС) и др.) и энергетической эффективности перевозок (снижение массы ТС, применение асинхронного электропривода, внедрение энергосберегающих систем управления тяговым приводом, систем рекуперации и др.).

Также необходимо отметить, что в рамках программы Комплексного развития ГЭТ планируется реализация проекта по созданию цифровой платформы по управлению общественным транспортом, которая позволит контролировать весь процесс пассажироперевозок, осуществлять диспетчерское управление и мониторинг пассажиропотока, планировать маршруты и т.д. [1]. Данный проект соответствует целям и задачам Стратегического направления развития в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года, при решении которых особое внимание уделяется цифровизации пассажирских перевозок и цифровизации управления транспортным комплексом с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) [3].

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

Кроме того, к основным направлениям цифровой трансформации транспортной отрасли относятся задачи повышения уровня технологического развития и декарбонизации транспортного комплекса, а также цифровизации ТС, для решения которых активно ведутся разработки, связанные с беспилотным общественным электротранспортом [3]. В настоящее время успешно тестируются модели беспилотных электробусов, разработанные ПАО «КАМАЗ» (КАМАЗ-1221 «ШАТЛ») и ООО «Волгабас Робо Лаб» (платформа “MatrËshka”). На 2023-2024 гг. анонсированы запуски беспилотных трамваев в городах Москва, Санкт-Петербург, Казань. Усть-Катавский вагоностроительный завод, входящий в состав госкорпорации «Роскосмос», объявил о начале сборки первого полностью беспилотного отечественного трамвая.

В связи с этим отрасль ГЭТ остро нуждается в прорывных научных исследованиях фундаментального и прикладного характера по направлениям, связанным с разработкой перспективных видов электрической тяги, новых типов ТС и ТЭО, систем управления и др. [4], основанных на технологиях ИИ, перечень которых для применения в транспортной отрасли по видам транспорта и процессов утвержден Реестром технологий ИИ в транспортной отрасли [5].

Задачи беспилотного управления трамвайным транспортом на основе технологий ИИ появились как следующий этап развития систем автоведения рельсового электроподвижного состава, активно применяемых на железной дороге. При этом эксплуатация ГЭТ имеет ряд особенностей, характеризующихся технологией пассажирских перевозок в городской среде, которые предопределяют высокую эффективность внедрения систем интеллектуального управления.

Подвижной состав ГЭТ работает на заданном маршруте согласно утвержденному расписанию движения, основным документом для составления которого служит наряд, разрабатываемый на основе материалов обследования пассажиропотока, хронометражных измерений времени на пробег и пропускной способности узлов дорожной сети и определяющий число ТС на маршруте, их среднюю эксплуатационную скорость, наибольший допустимый интервал и др. [6]. В течение рабочей смены водитель, как правило, закрепленный за конкретным ТС выполняет несколько рейсов по заданному маршруту движения, что позволяет набрать большой массив данных, характеризующих режимы движения ТС в реальных условиях эксплуатации, для интеллектуального анализа.

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Все это открывает широкие перспективы для внедрения систем интеллектуального управления ГЭТ, основными задачами которых является повышение качества пассажироперевозок при кардинальной минимизации ДТП и экономии энергоресурсов. Внедрение таких технологий ИИ как «системы помощи водителю» и «прогнозирование дорожной обстановки» позволит реализовывать алгоритмы эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО городского электротранспорта, определяющие рациональные режимы вождения ТС, что приведет к улучшению эксплуатационных показателей ГЭТ, а также существенной экономии электроэнергии, расходуемой на тягу [7, 8]. Все вышесказанное определяет актуальность совершенствования технологии технического зрения, сбора и обработки потоков данных о параметрах движения, интеллектуального анализа информации на основе нейронных сетей и т.д.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМА ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Расчеты эффективных алгоритмов работы электротехнического комплекса ТЭО с применением нейронных сетей используются в тяговых расчетах железнодорожного транспорта, что позволило существенно повысить их точность и адекватность реальным условиям эксплуатации [9, 10]. При этом применение полученных нейросетевых моделей для определения рациональных режимов вождения наземного рельсового ГЭТ предполагает возникновение ряда несоответствий, предопределяющих их низкую эффективность. Это связано с принципиальным отличием режимов работы ТЭО, определяемых условиями эксплуатации ГЭТ, для которых характерны: короткие перегоны, а, следовательно, частые режимы тяги и торможения ТС; отсутствие движения ТС с установившейся скоростью; остановки на неконтролируемых перекрестках; большое количество участков с ограничением скорости и др.

Таким образом, требуется разработка и обучение нейросетевых моделей для определения параметров алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО, учитывающих специфику технологического и производственного процессов ГЭТ. При этом для определения эффективной архитектуры нейронной сети

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

основными задачами являются подготовка набора данных (dataset), определяющих режимы работы ТЭО транспортного средства в условиях реальной эксплуатации ГЭТ, а также выбор и обоснование состава параметров входного и выходного слоев.

Рассмотрим некоторые аспекты применения нейронных сетей для обоснования алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО городского электротранспорта.

Согласно ГОСТ 19350–74 «Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения» выделяют следующие режимы работы ТЭО, соответствующие режимам движения ТС (Рис. 1): тяговый режим (с различной степенью возбуждения тягового электродвигателя (ТЭД)) и режимам торможения (рекуперативный, реостатный). Указанным режимам соответствуют характерные режимы работы ТЭД, являющихся основным элементом ТЭО (Рис. 1а).

Согласно ГОСТ 2582–2013 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия» для ТЭД характерны режимы работы: продолжительный (S_1), кратковременный (S_2), повторно-кратковременный (S_3). Особенностью эксплуатации ТС ГЭТ являются короткие перегоны и частые пуски ТЭД, а, следовательно, преобладание режимов S_2 и S_3. Основными параметрами этих режимов является соотношение продолжительности режимов под нагрузкой (тяга или торможение) и без нагрузки (выбег или остановка) (Рис. 1).

Под алгоритмом эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО ТС будем понимать определенную последовательность переключения режимов работы ТЭО, выполняемую водителем в соответствии с технологией эксплуатации ГЭТ, обеспечивающую минимальный расход электроэнергии на тягу ТС, при движении на заданном маршруте по установленному расписанию. В качестве параметров, однозначно определяющих выбранную последовательность режимов работы ТЭО при движении ТС на *i*-м перегоне, будем использовать значения: продолжительности тягового режима (разгона) $t_{\text{р}i}$, с; времени начала торможения $t_{\text{т}i}$, с; времени хода $T_{\text{х}i}$, с; максимальной скорости разгона $V_{\text{р}i}$, км/ч; скорости начала торможения ТС $V_{\text{т}i}$, км/ч (Рис. 1). Для оценки энергетических показателей работы ТЭО целесообразно выбрать величину удельного расхода электроэнергии (УРЭ) $A_{\text{уд}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км}$, затрачиваемой на тягу ТС. Условимся, что реализуемый при движении ТС на *i*-м перегоне заданной длины алгоритм управления электротехническим комплексом ТЭО принимается эффективным (рациональным) если УРЭ

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

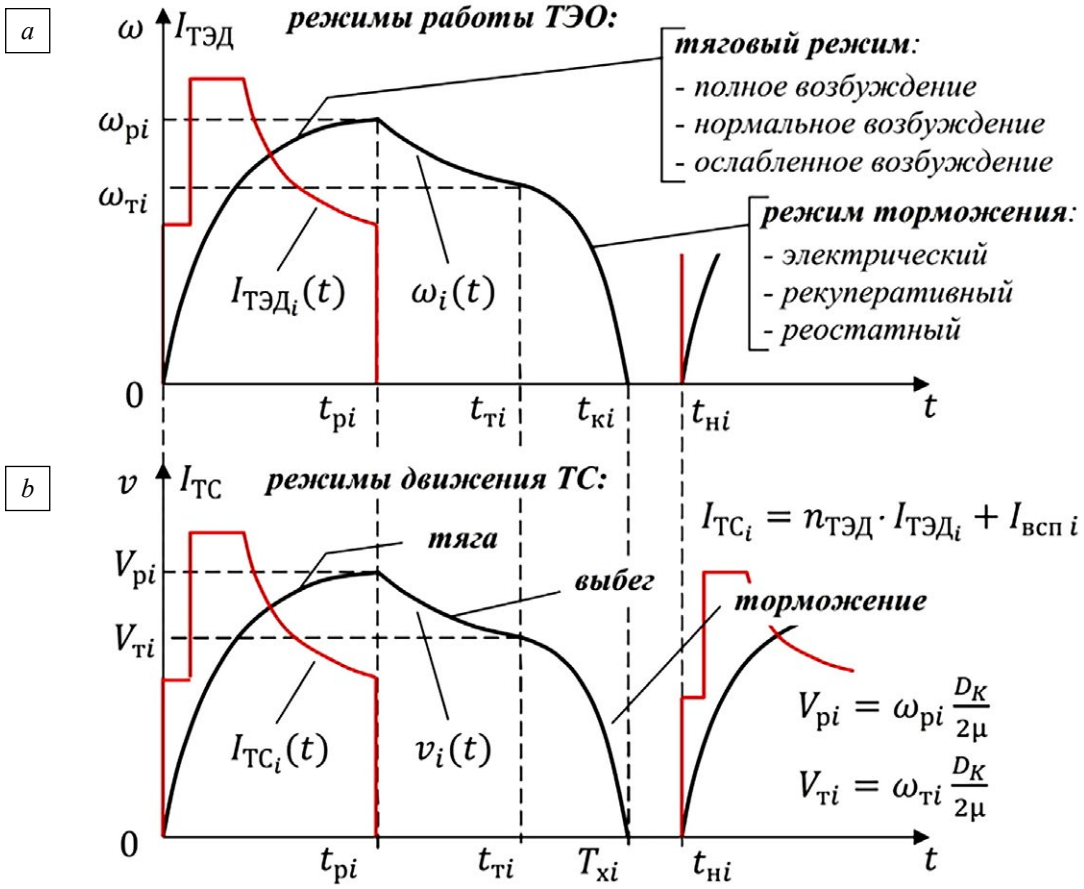


Рис. 1. Характерные для ГЭТ режимы работы ТЭО (*a*)
и режимы движения ТС (*b*) во взаимосвязи
t_{pi} t_{ti} – продолжительность тягового режима (разгона) и время начала торможения на *i*-м перегоне; V_{pi} V_{ti} – максимальная скорость разгона и скорость начала торможения ТС на *i*-м перегоне, ω_{pi} ω_{ti} – угловая скорость вала ТЭД в конце разгона и начале торможения ТС на *i*-м перегоне соответственно, T_{xi} – время хода на *i*-м перегоне; $v_i(t)$, $I_{TCi}(t)$ – кривые скорости и потребляемого тока ТС; $I_{ТЭДi}(t)$ – ток потребляемый ТЭД; $_{ТЭД}$ – число ТЭД в составе ТЭО ТС; $D_к$ – диаметр колеса ТС, μ – коэффициент передачи редуктора

Fig. 1. Typical for urban electric transport modes of traction electrical equipment (*a*)
and modes of vehicle traffic (*b*) in relationship
t_{pi} t_{ti} – duration of traction mode (acceleration) and braking start time at the *i*-th distance; V_{pi}, V_{ti} – maximum acceleration speed and braking start speed of the vehicle at the *i*-th distance, ω_{pi}, ω_{ti} – angular speed of the traction motor shaft at the end of acceleration and beginning of braking of the vehicle at the i-th distance, respectively; T_{xi} – travel time at the *i*-th distance; $v_i(t)$, $I_{TCi}(t)$ – speed and current consumption curves of the vehicle; $I_{ТЭДi}(t)$ – current consumed by the traction motor; $n_{ТЭД}$ – number of traction motors; $D_к$ – wheel diameter of the vehicle, μ – gearbox transfer coefficient

Received: 23.07.2024
Поступил: 23.07.2024
Revised: 14.09.2024
Одобрена: 14.09.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

$A_{\text{уд рац}}$ по значению меньше УРЭ, задаваемого в качестве нормы $A_{\text{уд н}}$ для данного участка пути.

Водитель ТС, посредством органов управления задает структуру и параметры алгоритма приключения режимов работы ТЭО, таким образом формируя режимы движения ТС (Рис. 1). Выбор водителя, предопределенный его опытом и квалификацией, формируется под влиянием множества эксплуатационных факторов, характеризующих реальные дорожные условия и технологию перевозочного процесса. Исследование этих факторов, оценка характера их влияния на режимы движения ТС, поиск адекватных теоретических и вероятностных моделей их взаимосвязи с параметрами режимов работы ТЭО является актуальной научной задачей, решение которой позволит существенно повысить качество набора данных для обучения искусственных нейронных сетей.

Для определения эксплуатационных факторов, влияющих на режимы работы ТЭО, автором ранее предложена модель управляемого движения ТС, являющегося в общем случае результатом преобразования, передачи и использования электрической энергии и информации в производственно-технической системе ГЭТ. Теоретическое обоснование модели, а также ее математическая интерпретация представлена в серии работ [11, 12]. Необходимо отметить, что управляемое движение ТС в данном случае рассматривается как реализация последовательности режимов работы ТЭО, заданной определенным алгоритмом управления, реализуемым водителем в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ.

За основу предложенной модели принята концепция «уровней построения движения», используемая академиком Д.Е. Охоцимским в работах по динамике космического полета, робототехнике и мехатронике [13]. Данная концепция, реализует принципы организации работы мозга человека при выполнении спортивных, трудовых и других движений, которые были изучены и сформулированы выдающимся советским физиологом и биомехаником Н.А. Бернштейном в его научном труде «О построении движений» [14].

Такой подход при изучении управляемого движения ТС ГЭТ соответствует современным тенденциям заимствования биологических аналогий при исследовании работы сложных технических систем. Следует отметить, что прототипом искусственных нейронных сетей, предлагаемых в данной работе и активно применяющихся во многих

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

технологиях ИИ, утвержденных для транспортной отрасли, являются именно биологические нейронные сети человеческого мозга [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании предложенной модели было проведено компьютерное моделирование режимов работы ТЭО с использованием детерминированных и стохастических моделей, характеризующих априорные данные о различных эксплуатационных факторах, выраженных такими физическими параметрами как: напряжение контактной сети $U_{кс}$, интервал следования ТС J, количество включения ТЭО на перегоне $n_{вкл}$, длина перегона L, масса ТС $m_{тс}$ и др. Это позволило идентифицировать уровень и направленность стохастических связей эксплуатационных и энергетических параметров процесса управляемого движения ТС и режимов работы ТЭО. Для наглядного представления результатов построена графическая корреляционная плеяда для статистических факторов $X_1 - X_{22}$ (Рис. 2).

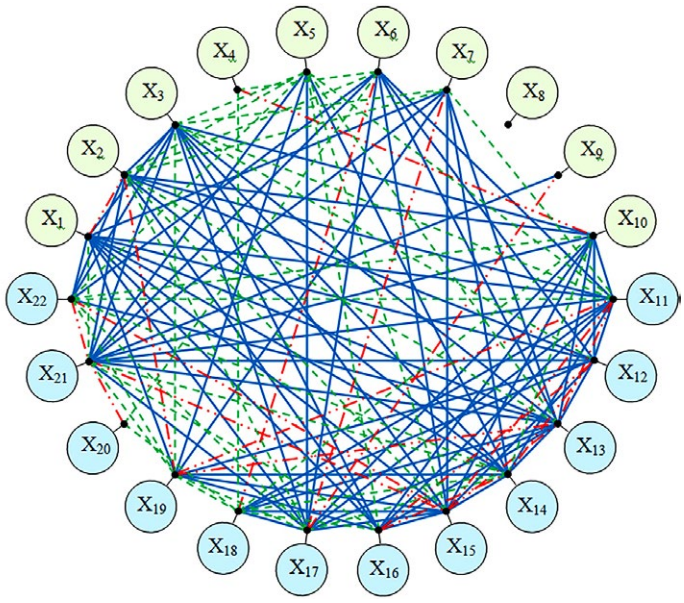


Рис. 2. Корреляционная плеяда взаимосвязей факторов, влияющих на формирование управляемого движения, полученная на основании компьютерного моделирования
Сила корреляционной связи (значение коэффициента корреляции r)
заметная ($0,5 \le r < 0,7$) сильная ($0,7 \le r < 0,9$) очень сильная ($0,9 \le r < 1$)

Fig. 2. The correlation pleiad of interrelations of factors influencing the formation of controlled motion, obtained on the basis of computer modeling
Correlation strength (value of correlation coefficient r)
high moderate ($0,5 \le r < 0,7$) high ($0,7 \le r < 0,9$) very high ($0,9 \le r < 1$)

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

В ходе анализа результатов моделирования использовались методы статистического анализа, реализованные в прикладной компьютерной программе STATISTICA [15].

Описание статистических факторов и соответствующих им физических параметров, характеризующих условия эксплуатации ТС, представлены в Табл. 1.

Таблица 1. *Факторы, характеризующие условия эксплуатации ТС*
Table 1. *Factors that characterize the vehicle operating conditions*

Обозначение статистического фактора	Обозначение физического параметра	Наименование физического параметра, единица измерения
X_1	L	Длина перегона, с
X_2	$T_х$	Время хода на перегоне, м
X_3	$V_с$	Скорость сообщения на перегоне, км/ч
X_4	J	Интервал следования ТС, с
X_5	$k_{огр}$	Коэффициент, учитывающий ограничения скорости движения ТС на перегоне
X_6	$\varepsilon_{ТС}$	Коэффициент составности ТС
X_7	$k_с$	Коэффициент сложности перегона
X_8	$k_{ТС}$	Коэффициент технического состояния ТС
X_9	$k_в$	Коэффициент, учитывающий качество вождения ТС на перегоне
X_{10}	k_U	Коэффициент, учитывающий отклонение $U_{кс}$

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования были проведены комплексные экспериментальные исследования эксплуатационных режимов ТС в различных городах России (Москва, Волгоград, Самара, Уфа, Пермь, Казань, Набережные Челны, Новочеркасск) с типовыми схемами маршрутной сети (радиальная, радиально-кольцевая, прямоугольная и свободная). Это позволило получить репрезентативную статистическую выборку, характеризующую параметры режимов работы ТЭО ТС, соответствующих технологическому процессу городских пассажироперевозок на действующих маршрутах в реальных производственных условиях ГЭТ [16].

Дальнейший статистический анализ результатов экспериментального исследования подтвердил корреляционные связи между основными факторами, определяющими режимы эксплуатации ТС городского электрического транспорта и параметрами режимов работы

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

электротехнического комплекса ТЭО. Результаты представлены на Рис. 3 в виде корреляционной плеяды взаимосвязей факторов $X_1 - X_{22}$.

Описание статистических факторов и соответствующих им физических параметров, характеризующих режимы движения ТС и работы тягового электрооборудования представлены в Табл. 2.

Числовые значения коэффициентов парных корреляций статистических факторов $X_1 - X_{22}$ и величины удельного расхода электроэнергии $A_{уд}$, затрачиваемой на тягу ТС, представлены в виде матрицы на Рис. 4. При этом результаты компьютерного моделирования расположены ниже главной диагонали, результаты реального экспериментального исследования – выше.

Анализ корреляционных плеяд (Рис. 2, 3) и матрицы коэффициентов парных корреляций (Рис. 4) показал, что некоторые статистические связи, определяющие влияние эксплуатационных факторов на параметры

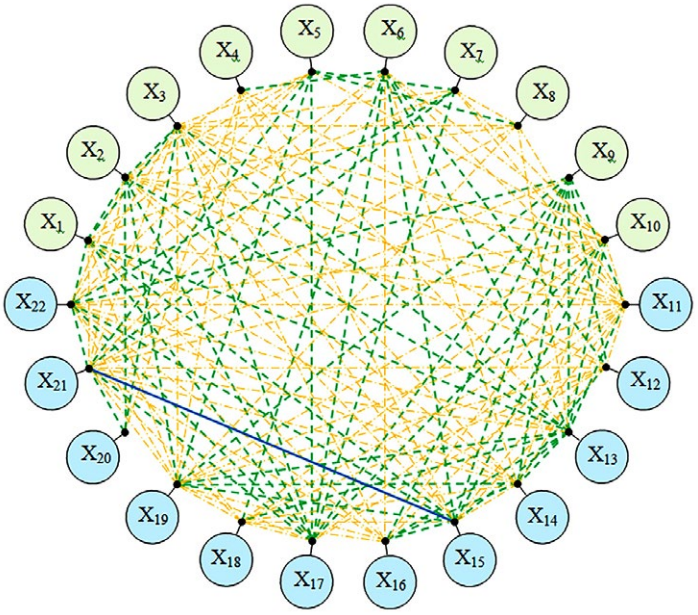


Рис. 3. Корреляционная плеяда взаимосвязей факторов, влияющих на формирование управляемого движения, полученная на основании экспериментальных исследований
Сила корреляционной связи (значение коэффициента корреляции)
умеренная ($0,3 \le r < 0,5$) заметная ($0,5 \le r < 0,7$) сильная ($0,7 \le r < 0,9$)

Fig. 3. The correlation pleiad of interrelations of factors influencing the formation of controlled motion, obtained on the basis of experimental studies
Correlation strength (value of correlation coefficient r)
moderate ($0,3 \le r < 0,5$) high moderate ($0,5 \le r < 0,7$) high ($0,7 \le r < 0,9$)

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Таблица 2. *Факторы, характеризующие процесс реализации управляемого движения*
Table 2. *Factors that characterize the process of building a controlled movement of the vehicle*

Обозначение статистического фактора	Обозначение физического параметра	Наименование физического параметра, единица измерения
X_{11}	a	Ускорение разгона ТС, м/с^2
X_{12}	b	Тормозное замедление ТС, м/с^2
X_{13}	$V_р$	Максимальная скорость разгона ТС, км/ч
X_{14}	$V_т$	Скорость начала торможения ТС, км/ч
X_{15}	$t_р$	Время разгона* (тяговый режим) ТС, с
X_{16}	$t_т$	Время торможения* (тормозной режим) ТС, с
X_{17}	$n_{вкл}$	Количество включений ТЭО на перегоне
X_{18}	$m_{ТС}$	Масса ТС с пассажирами, т
X_{19}	$\eta_в$	Коэффициент выбега ТС*
X_{20}	$t_{ОП}$	Продолжительность посадки пассажиров, с
X_{21}	$\tau_{уст}$	Установившийся перегрев ТЭД, °С
X_{22}	$t_{пн}$	Продолжительность постоянной нагрузки ТЭО*, с

* При многократных включениях ТЭО учитывается суммарная продолжительность работы в соответствующих режимах

алгоритмов управления режимами работы ТЭО, выявленные на основе компьютерного моделирования, в реальных условиях эксплуатации ГЭТ проявляются слабее. Также по результатам эксперимента были выявлены связи, не выразившиеся при компьютерном моделировании, которые оказывают влияние на режимы работы ТЭО, что дало возможность внести корректировки в разработанную математическую модель управляемого движения ТС городского электрического транспорта.

Проведенные исследования позволили ограничить избыточность выборки обучающих данных (data set), исключив их нее значения для факторов, характеризующихся «слабой» корреляционной связью ($r < 0,3$). Кроме того, при формировании состава входного и выходного слоев нейронных сетей рассматривались только параметры, для которых соответствующие статистические факторы характеризовались «заметной» $(0,5 \le r < 0,7)$ и «сильной» $(0,7 \le r < 0,9)$ корреляционной связью.

Необходимо отметить, что, как правило, нейросетевые модели для определения параметров движения ТС, учитывающие широкий комплекс

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

		$A_{уд}$	X_1 L	X_2 T_X	X_3 V_C	X_4 J	X_5 $k_{ОГР}$	X_6 $\varepsilon_{эпс}$	X_7 k_c	X_8 $k_{тс}$	X_9 $k_в$	X_{10} k_U	X_{11} a	X_{12} b	X_{13} $V_Р$	X_{14} $V_Т$	X_{15} $t_Р$	X_{16} $t_Т$	X_{17} $n_{вкл}$	X_{18} $m_{эпс}$	X_{19} $\eta_В$	X_{20} $t_{ОП}$	X_{21} $\tau_{уст}$	X_{22} $t_{ПН}$	
	$A_{уд}$	1	-0,47	-0,34	0,37	0,21	0,33	-0,52	0,63	-0,51	-0,59	0,36	-0,32	-0,25	0,61	0,52	0,57	0,54	0,63	-0,51	-0,67	0,12	0,38	0,69	Результаты экспериментального исследования
X_1	L	-0,71	1	0,67	0,51	0,27	0,35	0,09	0,34	-0,26	-0,11	0,25	0,37	0,23	0,59	0,42	0,63	0,47	0,65	0,19	0,33	0,15	0,37	0,56	
X_2	T_X	-0,73	0,92	1	-0,63	0,32	0,31	0,19	0,22	-0,21	0,17	0,39	-0,37	-0,30	-0,58	-0,42	-0,45	-0,21	-0,54	0,28	0,51	-0,25	-0,30	-0,39	
X_3	V_C	0,62	0,61	-0,72	1	0,21	-0,31	-0,21	-0,39	0,32	0,12	-0,35	0,43	0,32	0,50	0,32	0,48	0,3	0,57	-0,18	-0,36	-0,51	0,36	0,48	
X_4	J	0,10	0,26	0,15	0,12	1	0,11	0,63	0,09	-0,11	-0,04	-0,54	0,39	0,23	0,35	0,28	0,31	0,21	-0,16	0,12	0,37	0,33	0,27	0,22	
X_5	$k_{ОГР}$	0,72	0,23	0,61	-0,62	0,11	1	-0,08	0,57	-0,54	-0,19	0,33	-0,18	-0,11	-0,28	-0,12	-0,29	-0,08	0,51	0,16	-0,50	-0,12	0,56	-0,31	
X_6	$\varepsilon_{эпс}$	-0,74	-0,08	0,62	-0,41	0,62	0,09	1	-0,03	-0,27	-0,16	0,37	-0,44	-0,49	0,52	0,43	0,59	0,48	0,53	0,61	-0,25	0,22	0,47	0,33	
X_7	k_c	0,66	0,73	0,69	-0,52	0,10	0,72	-0,08	1	-0,31	-0,27	0,33	-0,37	0,29	-0,27	-0,22	-0,28	0,19	0,65	0,12	-0,22	0,11	0,52	-0,56	
X_8	$k_{тс}$	-0,65	-0,31	-0,30	0,45	-0,11	-0,56	-0,32	-0,47	1	-0,11	-0,27	0,31	0,22	0,31	0,26	0,29	0,22	-0,28	0,09	0,31	0,09	-0,33	-0,23	
X_9	$k_в$	-0,91	0,10	0,09	0,24	0,13	-0,19	0,08	-0,35	-0,33	1	-0,19	0,56	0,59	0,61	-0,62	-0,63	-0,60	-0,55	0,10	0,55	0,16	-0,30	-0,56	
X_{10}	k_U	0,76	0,33	0,72	-0,75	-0,90	0,21	0,65	0,20	-0,25	-0,27	1	0,48	-0,29	0,53	-0,33	0,62	-0,33	0,51	0,42	-0,39	-0,12	0,37	0,46	
X_{11}	a	-0,84	0,73	-0,81	0,65	0,22	-0,62	-0,52	-0,63	0,39	0,77	0,71	1	0,32	0,61	-0,43	-0,48	-0,34	0,35	0,33	0,48	0,15	0,28	-0,31	
X_{12}	b	-0,62	0,71	-0,79	0,61	0,21	0,22	-0,55	0,22	0,30	0,66	-0,72	0,83	1	0,29	0,52	0,32	-0,29	0,39	0,30	0,33	0,19	0,37	0,23	
X_{13}	$V_Р$	0,91	0,75	-0,69	0,72	0,19	-0,63	0,72	-0,71	0,35	0,72	0,74	0,90	0,83	1	0,66	0,62	0,53	-0,25	0,58	0,63	-0,12	0,38	0,32	
X_{14}	$V_Т$	0,73	0,63	-0,72	0,74	0,21	-0,70	0,33	-0,63	0,33	-0,68	-0,67	-0,81	0,91	0,82	1	0,44	0,59	-0,18	0,46	-0,59	-0,18	0,42	0,30	
X_{15}	$t_Р$	0,90	0,80	-0,69	0,71	0,23	-0,63	0,84	-0,52	0,15	-0,77	0,84	-0,90	0,81	0,93	0,80	1	0,56	-0,27	0,38	-0,53	-0,23	0,72	0,68	
X_{16}	$t_Т$	0,60	0,70	-0,62	0,63	0,23	-0,63	0,35	0,32	0,18	-0,72	-0,83	-0,80	-0,93	0,82	0,91	0,81	1	-0,13	0,33	-0,36	-0,20	0,49	0,33	
X_{17}	$n_{вкл}$	0,73	0,83	-0,65	0,73	0,11	0,71	0,72	0,92	-0,35	-0,91	0,83	0,63	0,31	-0,71	0,61	-0,72	-0,34	1	0,39	-0,40	0,12	0,51	0,55	
X_{18}	$m_{эпс}$	-0,61	0,10	0,31	-0,15	0,51	0,08	0,91	0,09	0,09	0,09	0,52	0,61	0,60	0,84	0,66	0,82	0,61	0,82	1	-0,34	0,24	0,31	0,49	
X_{19}	$\eta_В$	-0,74	0,72	0,92	-0,6	0,11	-0,70	-0,31	-0,64	0,43	0,85	-0,35	0,90	0,7	0,91	-0,81	-0,81	-0,73	-0,62	-0,62	1	-0,13	-0,36	-0,30	
X_{20}	$t_{ОП}$	0,06	0,15	-0,09	-0,74	0,10	0,11	0,61	-0,11	0,10	0,15	-0,15	0,10	-0,06	0,09	0,09	0,11	0,09	-0,07	0,61	-0,17	1	-0,51	-0,16	
X_{21}	$\tau_{уст}$	0,82	0,61	-0,73	0,83	0,23	0,71	0,71	0,72	-0,30	-0,70	0,71	0,71	0,72	0,81	0,63	0,92	0,62	0,71	0,34	-0,52	-0,91	1	0,58	
X_{22}	$t_{ПН}$	0,90	0,71	-0,71	0,73	0,21	-0,65	0,72	-0,34	-0,29	-0,73	0,60	-0,65	0,20	0,82	0,62	0,90	0,31	0,61	0,43	-0,61	-0,70	0,91	1	
		Результаты компьютерного моделирования																							

Рис. 4. Матрица коэффициентов парных корреляций для величины УРЭ $A_{уд}$ и статистических факторов, определяющих режимы работы ТЭО
Сила корреляционной связи (значение коэффициента корреляции r)
умеренная $(0,3 \le r < 0,5)$ заметная $(0,5 \le r < 0,7)$ сильная $(0,7 \le r < 0,9)$ очень сильная $(0,9 \le r < 1)$

Fig. 4. Matrix of pair correlation coefficients for the value of specific power consumption $A_{уд}$ and statistical factors determining the modes of operation of traction electrical equipment
Correlation strength (value of correlation coefficient r)
moderate $(0,3 \le r < 0,5)$ high moderate $(0,5 \le r < 0,7)$ high $(0,7 \le r < 0,9)$ very high $(0,9 \le r < 1)$

эксплуатационных факторов, характеризуются сложной архитектурой и значительным количеством скрытых слоев и нейронов. Обладая широкими возможностями обработки информации, такие нейронные сети могут быть склонны к переобучению или требуют существенных временных и аппаратно-программных ресурсов, что является критичным при построении бортовых систем автономного управления, обеспечивающих движение ТС в реальном времени.

Проведенные исследования показывают возможность использования комплекс небольших нейросетевых моделей для решения частных (локальных) задач с ограниченным количеством факторов с последующим их включением в общий (глобальный) алгоритм

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО ГЭТ.

Рассмотрим алгоритм определения параметров режимов работы ТЭО для трамвайного вагона 71-619К при движении на перегоне заданной длины L. Для некоторого упрощения алгоритма условимся, что сложные перекрестки и участки ограничения скорости на перегоне отсутствуют, план и профиль пути учитывается величиной эквивалентного уклона $i_э$, ‰, а влияние таких факторов, как отклонение напряжения в контактной сети, квалификация водителя, техническое состояние подвижного состава, рельсового пути, отсутствует.

Согласно СНиП 2.05.09-90 «Трамвайные и троллейбусные линии» при строительстве трамвайных линий расстояние между остановочными пунктами следует принимать: для обычных линий от 400 м до 600 м, для скоростных линий – от 800 м до 1200 м. Исследование реальных условий эксплуатации выявило, что наиболее вероятными для маршрутных систем ГЭТ являются длины перегонов в диапазоне от 300 мдо 700 м (Рис. 5). При этом число включений ТЭО на перегоне распределено в следующем соотношении: $n_{вкл}$ = 1–32%; $n_{вкл}$ = 2–46%; $n_{вкл}$ = 3–17%; $n_{вкл} \geq 4$–5%. Количество включений ТЭО на перегоне $n_{вкл} \geq 4$, как правило, связано с прохождением неконтролируемых перекрестков или участков с ограничением скорости и может не учитываться.

Таким образом, общий алгоритм может быть реализован на основании трех нейронных сетей для «частных» задач определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО при количестве включений $n_{вкл}$ от 1 до 3 на заданном перегоне.

Выбор эффективной архитектуры нейронный сетей осуществлялся с применением модуля Automated Neural Networks программы STATISTICA [17]. В качестве входных параметров для нейросетевой модели при $n_{вкл}$ = 1 были выбраны следующие эксплуатационные факторы: длина перегона L, м; время хода на перегоне $T_х$, с; масса ТС $m_{ТС}$, т; значение эквивалентного уклона перегона $i_э$, ‰. Выходом сети являются основные параметры алгоритма управления электротехническим комплексом ТЭО при реализации одного включения на перегоне ($n_{вкл}$ = 1): продолжительность разгона (тяговый режим) $t_{р1}$, с при первом включении ТЭО; максимальная скорость разгона $V_{р1}$, км/ч при первом включении ТЭО; продолжительность торможения (режим торможения) $t_т$, с; скорость начала торможения $V_т$, км/ч; величина УРЭ $A_{уд}$, $кВт \cdot ч / т \cdot км$. Обучающая выборка составляет 70% значений, контрольная – 15%,

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

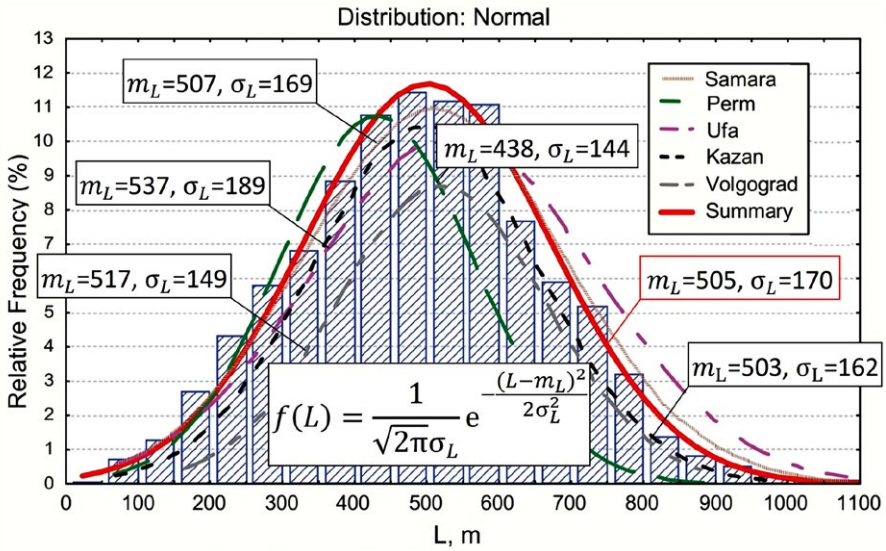


Рис. 5. Распределение значений длин перегонов L, м, характерных для ГЭТ

Fig. 5. Distribution of lengths of distances L, m, typical for urban electric transport

тестовая – 15% значений. В ходе исследования осуществляется эмпирический подбор и сравнение по критерию среднеквадратической ошибки.

В результате исследования было установлено, что наиболее эффективной архитектурой обладает сеть MLP 4-11-5. Данная нейросетевая модель представляет собой многослойный персептрон, имеющий 4 нейрона на входном слое, 5 нейронов на выходном слое и 11 нейронов на одном скрытом слое. Активационная функция входного слоя – гиперболическая, выходного слоя – экспонента. Нейронная сеть имеет обучающую и контрольную производительность более 0,85, тестовую – более 0,82 (Рис. 6, a).

Число и перечень входных параметров для нейросетевой модели для $n_{\text{вкл}} = 2$ аналогичны предыдущей модели. Выходом сети кроме 5 параметров, используемых для модели при $n_{\text{вкл}} = 1$, являются: скорость начала второго включении ТЭО $V_{\text{н2}}$, км/ч, продолжительность разгона $t_{\text{р2}}$, с и максимальная скорость разгона $V_{\text{р2}}$, км/ч при втором включении ТЭО. Наиболее эффективной архитектурой в этом случае обладает сеть MLP 4-6-9-8, которая представляет собой многослойный персептрон, имеющий 4 нейрона на входном слое, 8 нейронов на выходном слое, 6 и 9 нейронов на первом и втором скрытых слоях соответственно. Модель имеет обучающую и контрольную производительность более 0,82, тестовую – более 0,80 (Рис. 6, b).

Received: 23.07.2024
Поступил: 23.07.2024
Revised: 14.09.2024
Одобрена: 14.09.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

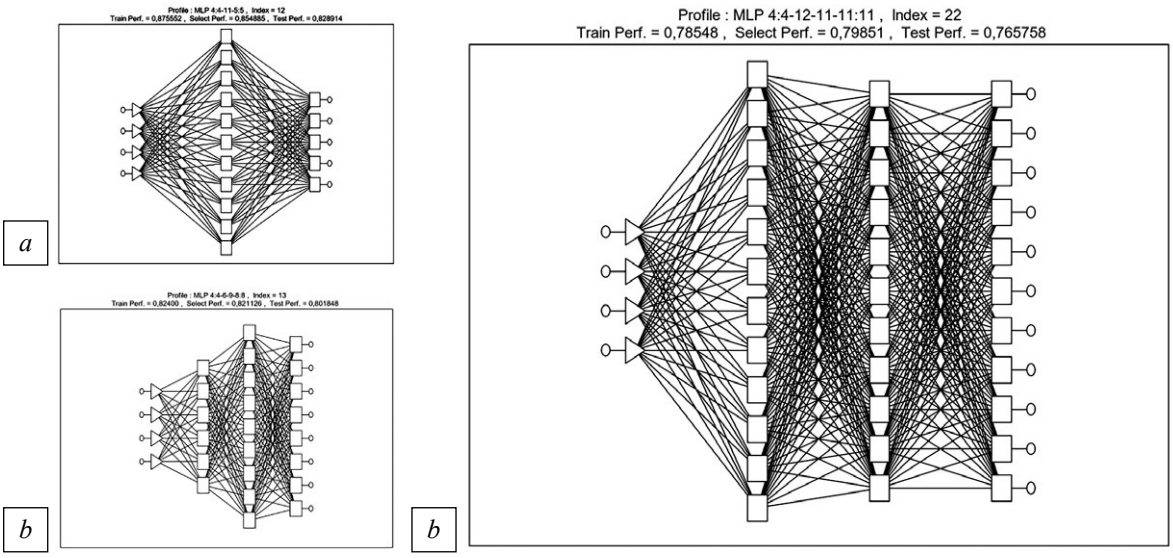


Рис. 6. Нейронные сети на основе многослойного персептрона: MLP 4-11-5 (*a*); MLP 4-6-9-8 (*b*); MLP 4-12-11-11 (*c*)

Fig. 6. Neural networks based on multilayer perceptron: MLP 4-11-5 (*a*); MLP 4-6-9-8 (*b*); MLP 4-12-11-11 (*c*)

Аналогичным образом формируется число и перечень входных и выходных параметров для нейросетевой модели для $n_{\text{вкл}} = 3$. Выходом сети кроме 8 параметров, используемых для модели при $n_{\text{вкл}} = 2$ являются: $V_{\text{н3}}$, $t_{\text{р3}}$, $V_{\text{р3}}$. Эффективной архитектурой в этом случая обладает сеть MLP 4-12-11-11, имеющей обучающую и контрольную производительность более 0,78, тестовую – более 0,76 (Рис. 6, с).

Общий алгоритм определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО для трамвайного вагона 71-619К при движении на перегоне заданной длины, реализованный с применением нескольких нейросетевых моделей на основе многослойных персептронов разных уровней сложности представлен на Рис. 7.

Особенностью предложенного алгоритма является его реализация на относительно «простых» нейронных сетях, но с разным числом и составом промежуточных слоев и количеством нейронов на выходном слое. При этом, чем сложнее архитектура используемой алгоритмом нейросетевой модели, тем меньше вероятность ее применения при расчете параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО, что позволяет обеспечить высокую скорость вычислений.

Для учета более широкого комплекса эксплуатационных факторов, характеризующих технологический и производственный процессы ГЭТ, целесообразно увеличить количество нейронных сетей в структуре

Received: 23.07.2024 Revised: 14.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.07.2024 Одобрена: 14.09.2024 Принята: 30.09.2024

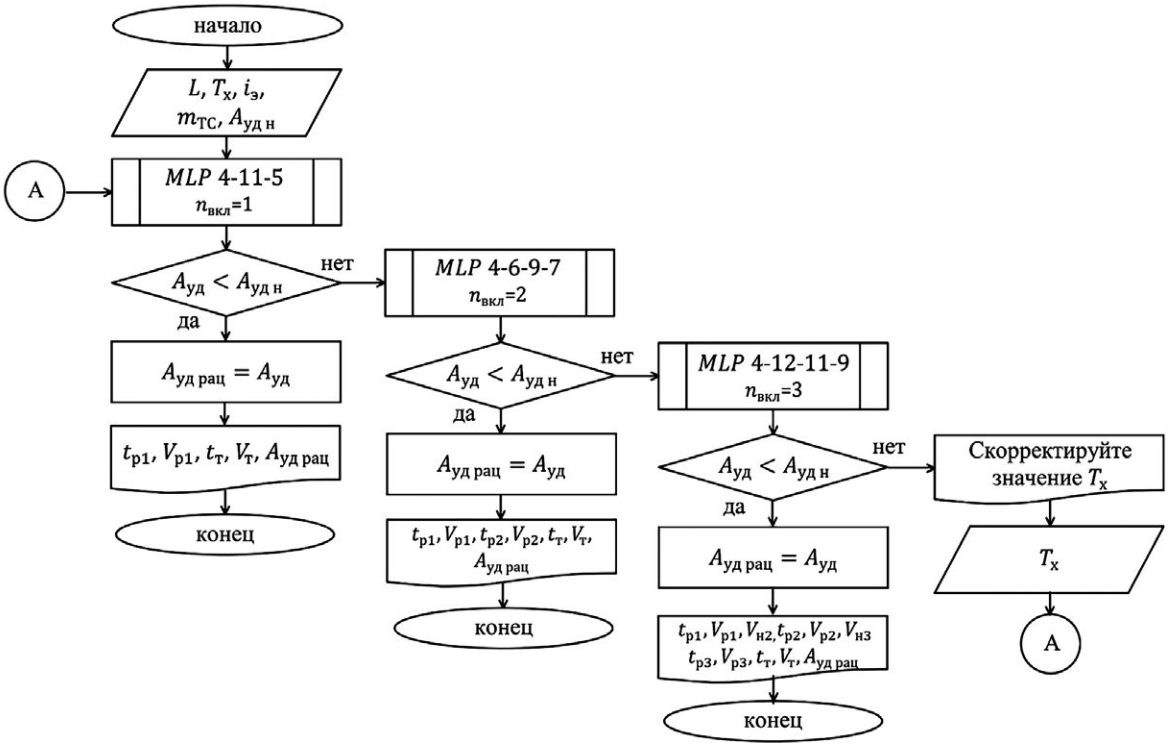


Рис. 7. Общий алгоритм определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО

Fig. 7. General algorithm for determining the parameters of effective control of the traction electrical equipment electrical complex

алгоритма. Также возможно применение нейросетевых моделей более сложной архитектуры и с большим количеством скрытых слоев и нейронов. Все это сделает предложенный алгоритм более сложным и потребует дополнительных вычислительных и временных ресурсов, но существенно повысит точность расчета.

Необходимо отметить, что особенностью применяемого в исследовании модуля Automated Neural Networks программы STATISTICA является возможность создания исходного системного кода нейросетевой модели в виде файла на языках C, C++, C# или Java [17]. Это позволило разработать и обучить комплекс нейронных сетей для различных частных случаев управляемого движения ТС ГЭТ и интегрировать их итоговый системный код в общую программу расчета параметров алгоритма эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализуемая Правительством РФ комплексная программа цифровизации транспортной отрасли предполагает внедрение в систему

Received: 23.07.2024
Поступил: 23.07.2024
Revised: 14.09.2024
Одобрена: 14.09.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

городских пассажирских перевозок беспилотного (интеллектуального) общественного электротранспорта. Это потребует от отечественных производителей ГЭТ создания рекомендательных систем эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО транспортных средств на основе технологий искусственного интеллекта.

Использование нейросетевого моделирования в системах поддержки принятия решений («системы помощи водителю») требует проведения комплексного исследования технологического процесса управляемого движения ТС общественного электрического транспорта. Указанное обстоятельство необходимо для обоснования эффективной архитектуры нейронных сетей и подготовки для их обучения адекватного набора данных (dataset), соответствующего реальным условиям эксплуатации ГЭТ.

Представленные в работе результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований отображают характер и степень стохастических взаимосвязей между эксплуатационными и энергетическими факторами, характеризующими управляемое движение ТС, а также параметрами алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО. Это позволило сформировать достаточно полный, но не избыточный набор данных (dataset) для обучения нескольких искусственных нейронных сетей, с достаточно высокой точностью определяющих параметры эффективного управления ТЭО для «частных» случаев реализации движения ТС на заданном перегоне. Полученные нейросетевые модели характеризуются эффективной архитектурой, обусловленной применением современных методов и алгоритмов анализа, реализованных в модуле Automated Neural Networks прикладной программы STATISTICA. На основе полученных нейросетевых моделей разработан общий алгоритм определения параметров эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО ТС, обеспечивающий высокую оперативность расчетов и их адекватность реальным эксплуатационным значениям, характерным для наземного рельсового общественного электротранспорта.

Результаты работы могут представлять интерес для разработчиков высокоавтоматизированного городского электрического транспорта и интеллектуальных систем «помощи водителю».

Авторы заявляют, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.
The authors state that this article does not contain any studies involving human subjects.

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В 10 российских регионах модернизируют городской электротранспорт. Министерство транспорта Российской Федерации, 2023. [интернет] Дата обращения: 15.07.2024. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10762
2. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ №660 от 31 марта 2015 г. «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли транспортного машиностроения Российской Федерации». Дата обращения: 06.05.2024. Режим доступа: https://base.garant.ru/57427568/
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3097-р от 3 ноября 2023 г. «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года». Дата обращения: 15.07.2024. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/documents/2/12953
4. Пролиско Е.Е., Шуть В.Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта // Математические методы в технике и технологиях. 2018. Т. 9. С. 16–23.
5. Реестр технологий искусственного интеллекта в транспортной отрасли [интернет] Министерство транспорта Российской Федерации, 2024. Дата обращения: 15.07.2024. Режим доступа: https://mintrans.gov.ru/documents/10/13491
6. Троицкая Н.А., Чубуков А.Б. Единая транспортная система. Москва: Academia, 2018.
7. Абдулхаков А.К., Павлов П.П., Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С. Особенности построения систем автоматизированного управления движением трамваев. В кн.: Международный форум «KAZAN DIGITAL WEEK – 2021»; Сентябрь 21–24, 2021; Казань. Сборник материалов. Ч. 1. Казань, 2021. С. 20–25. EDN: XNCASR
8. Rylov Yu.A., Solovyeva S.I., Korolkov A.Yu. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock // Modern Science. 2017. № 9. P. 137–140.
9. Малахов С.В., Капустин М.Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 1. С. 13–19. EDN: VTGPTM doi: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19
10. Сивицкий Д.А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2. С. 33–41. EDN: EPTXTN doi: 10.52170/1815-9265_2021_57_33
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019618673 / 03.07.2019. Бюл. №7. Аухадеев А.Э., Идиятуллин Р.Г., Киснеева Л.Н., и др. Программа расчета рациональных режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного состава при движении по заданному маршруту с учетом влияния эксплуатационных факторов. EDN: MASGAF

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

12. Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Киснеева Л.Н., Тухбатуллина Д.И. К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15, № 4. С. 12–18. EDN: XMUJDE doi: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18
13. Платонов А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике // Прикладная механика и управление движением. 2010. С. 127–222.
14. Бернштейн Н.А. О построении движений. Москва: Медгиз, 1947.
15. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе Statistica. Москва: Горячая линия – Телеком, 2013.
16. Свидетельство о регистрации базы данных № 2020621735 / 23.09.20. Бюл. № 10. Аухадеев А.Э., Идиятуллин Р.Г., Залялов Р.Р., и др. База данных основных энергетических и эксплуатационных характеристик производственного процесса трамвайного транспорта. EDN: XMRUNI
17. Боровикова В.П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных. Москва: Горячая линия – Телеком, 2008.
18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023661296/ 03.05.2023. Бюл. №6. Аухадеев А.Э., Литвиненко Р.С., Ле К.Т., Юнусов И.Ф., Гарифуллин Р.Р. Программа определения рациональных режимов работы тягового электрооборудования наземного городского электрического транспорта на основе группы нейронных сетей прямого распространения. EDN: IRQGIA

REFERENCES

1. Urban electric transport is being modernized in 10 Russian regions [internet] Ministry of Transport of the Russian Federation; 2023. [cited 15.07.2024]. Available from: https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10762
2. Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation № 660 of 31 March 2015. “Ob utverzhdenii plana meropriyatij po importozameshheniyu v otrasli transportnogo mashinostroeniya Rossijskoj Federacii”. [cited 06.08.2024]. Available from: https://base.garant.ru/57427568/ (In Russ).
3. Order of the Government of the Russian Federation №3097-r of 3 November 2023. «Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti cifrovoj transformacii transportnoj otrasli Rossijskoj Federacii do 2030 goda». [cited 15.07.2024]. Available from: https://mintrans.gov.ru/documents/2/12953 (In Russ).
4. Prolisko EE, Shut VN. Opportunities and prospects of unmanned urban public transportation. *Matematicheskie metody` v texnike i texnologiyax.* 2018;9:16–23. (In Russ).
5. Register of artificial intelligence technologies in the transport industry [internet] Ministry of Transport of the Russian Federation; 2024. [cited 15.07.2024]. Available from: https://mintrans.gov.ru/documents/10/13491

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

6. Troitskaya NA, Chubukov AB. *Unified transportation system.* Moscow: Academia; 2018. (In Russ).
7. Abdulkhakov AK, Pavlov PP, Litvinenko RS. Features of building systems of automated tramway traffic control. In: *International Forum "KAZAN DIGITAL WEEK – 2021"; 2021 Sep 21–24; Kazan. Collection of materials. Part 1.* Kazan; 2021;20–25. (In Russ.)
8. Rylov YuA, Solovyeva SI, Korolkov AYu. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock. *Modern Science.* 2017;(9):137–140. (In Russ).
9. Malakhov SV, Kapustin MYu. Method of building an adaptive suboptimal stationary train motion regulator based on artificial neural networks. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta.* 2021;80(1):13–19. (In Russ). EDN: VTGPTM doi: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19
10. Sivitskiy DA. Analysis of experience and prospects of application of artificial neural networks on railway transport. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya.* 2021;(2):33–41. (In Russ).
11. Certificate of registration of computer program RUS № 2019618673 / 03.07.2019. Byul. № 7. Aukhadeev AE, Idiyatullin RG, Kisneeva LN, et al. *Programma rascheta racional'nyh rezhimov raboty tyagovogo elektrooborudovaniya elektropodvizhnogo sostava pri dvizhenii po zadannomu marshrutu s uchetom vliyaniya ekspluatacionnyh faktorov.* (In Russ).
12. Aukhadeev AE, Litvinenko RS, Kisneeva LN, Tukhbatullina DI. Toward the development of the theory of traction electrical equipment of urban electric transport. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy.* 2019; 15(4):12–18. (In Russ). EDN: XMUJDE doi: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18
13. Platonov AK. About motion construction in ballistics and mechatronics. *Prikladnaya mekhanika i upravlenie dvizheniem.* 2010:127–222. (In Russ).
14. Bernstein NA. *On the construction of movements.* Moscow: Medgiz; 1947. (In Russ).
15. Borovikov VP. *Popular introduction to modern data analysis in Statistica.* Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2013. (In Russ).
16. Certificate of database registration RUS № 2020621735/ 23.09.20. Buyl. № 10. Aukhadeev AE, Idiyatullin RG, Zalyalov RR, et al. *Database of the main energy and operational characteristics of the production process of tramway transport.* (In Russ). EDN: XMRUNI
17. Borovikov VP editor. Neural Networks. Statistica Neural Networks: Methodology and Technologies of Modern Data Analysis / 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2008. (In Russ).
18. Certificate of registration of computer program RUS № 2023661296/ 03.05.2023. Byul. № 6. Aukhadeev AE, Litvinenko RS, Le KT, et al. *Programma opredeleniya racional`ny`x rezhimov raboty` tyagovogo e`lektrooborudovaniya nazemnogo gorodskogo e`lektricheskogo transporta na osnove gruppy` nejronny`x setej pryamogo rasprostraneniya.* (In Russ). EDN: IRQGIA

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Сведения об авторах:
Аухадеев Авер Эрикович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;
E-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru

Information about the authors:
Aver E. Auhadeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 2902-4661; ORCID: 0000-0002-7191-4550;
E-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru

Received: 23.07.2024 **Revised: 14.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.07.2024 **Одобрена: 14.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Строительные конструкции, здания и сооружения

https://doi.org/10.17816/transsyst630095

© Е.И. Верех-Белоусова[1], А.В. Харламова[2]
[1] Луганский государственный университет имени Владимира Даля (Луганск, Россия)
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫЧИ В ГРАЖДАНСКОМ И ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Цель. Проведение анализа перспектив переработки отходов угледобычи в гражданском и дорожном строительстве.

Материалы и методы. Исследования проводились на примере породных отвалов восьми шахт, расположенных на территории Луганской Народной Республики. Согласно действующим методикам, проводился отбор проб отвальной породы с последующим лабораторным исследованием: содержания Al_2O_3 (до 22%) и общей серы (до 4%) в пробах породы различной степени метаморфизма, показателей ее пластичности и радиационных характеристик (до 220 Бк/кг).

Результаты. В статье рассмотрены вопросы переработки породных отвалов угольных шахт Луганской Народной Республики в качестве сырья для производства строительных материалов. Проведен краткий анализ существующих на сегодняшний день способов получения различных строительных материалов из отвальных пород. Полученные лабораторные данные, после проведенных исследований проб отвальной породы ряда шахт, доказывают возможность использования углеотходов в гражданском, промышленном и дорожном строительстве.

Заключение. Проведенные исследования и детальный анализ различных показателей и свойств отходов угледобычи Луганской Народной Республики, включая удельную эффективную активность и коэффициент эманирования, делают возможным применение отходов угледобычи в промышленном, гражданском и дорожном строительстве.

Ключевые слова: отвальная порода; отходы угледобычи; отвалы угольных шахт; сырье; переработка; утилизация; строительные материалы; дорожное строительство.

Как цитировать:
Верех-Белоусова Е.И., Харламова А.В. Применение отходов угледобычи в гражданском и дорожном строительстве // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 390–400. doi: 10.17816/transsyst630095

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Building structures, buildings and structures

© E.I. Verekh-Belousova[1], A.V. Kharlamova[2]
[1] Lugansk Vladimir Dahl State University
(Lugansk, Russia)
[2] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

APPLICATION OF COAL MINING WASTE IN CIVIL AND ROAD CONSTRUCTION

Aim: This study analyzes the potential for processing coal mining waste in civil and road construction.

Materials and Methods. The research focused on rock dumps from eight mines in the Lugansk People's Republic. According to current methods, samples of dump rock were collected and analyzed in the laboratory for various properties, including Al_2O_3 content (up to 22%), total sulfur (up to 4%) in rock samples of varying degrees of metamorphism, indicators of its plasticity, and radiation characteristics (up to 220 Bq/kg).

Results. This study addresses the processing of rock dumps from coal mines in the Lugansk People's Republic as a source of raw materials for building materials. A brief analysis of existing methods for obtaining various building materials from waste rocks was carried out. The laboratory tests on waste rock samples from several mines demonstrated their potential use in civil, industrial, and road construction.

Conclusion. The research provides a detailed analysis of various indicators and properties of coal mining waste in the Lugansk People's Republic, including specific effective activity and evaporation coefficient. Findings suggest that the waste rock can be effectively used as raw material in the construction industry, supporting the production of materials for industrial, civil, and road construction.

Keywords:: dump rock; coal mining waste; coal mine dumps; raw materials; processing; disposal; building materials; road construction.

To cite this article:
Verekh-Belousova EI, Kharlamova AV. Application of coal mining waste in civil and road construction. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):390–400. doi: 10.17816/transsyst630095

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

На территории Луганской Народной Республики функционирует значительное количество предприятий угольной промышленности, которые являются источниками интенсивного химического загрязнения окружающей среды. Так, при добыче угля подземным способом, в результате складирования отходов угледобычи и обогащения растет число насыпей пустой породы – отвалов и терриконов. По последним данным на территории ЛНР их насчитывается 556. Общая площадь занимаемых ими земель составляет 4,8 тыс. га и дополнительно включает 250 плановых накопителей, площадью 980 га. Все это приводит не только к отчуждению значительных территорий, но и к интенсивному загрязнению прилегающих к отвалам земель тяжелыми металлами, соединениями серы и другими химическими соединениями. Решением данной проблемы может выступить использование отвальной породы в качестве строительного сырья с целью дальнейшего применения в строительных отраслях промышленности. Известно, что промышленность строительных материалов и изделий характеризуется высокой материалоемкостью и может обеспечить утилизацию таких крупнотоннажных техногенных отходов, как породные отвалы (терриконы угледобычи).

Отечественная и мировая стройиндустрия все активней ориентируется на производство строительных материалов из техногенных отходов, так как сложившиеся современные экологические условия и требования к эффективности экономики устанавливают правила наиболее комплексного потребления сырья и ресурсов, тем самым повышая эффективность их использования и снижая негативное воздействие на окружающую среду.

На данный момент переработка отвальной породы не превышает 20% от общего годового выхода, а применение в качестве сырья для производства строительных материалов не получило широкого распространения на практике [1]. При этом, зная, что более 55% затрат приходится на материальные ресурсы, заложенные в смету стоимости изготовления значительного количества строительных материалов, можно утверждать, что для повышения эффективности их производства целесообразно применение отходов промышленности, как сырья для производства. Тем более внедрение таких малоотходных технологий будет способствовать улучшению состояния окружающей природной среды и уменьшению объемов накопленных отходов [2, 3].

Кроме того, отходы добычи и обогащения угля могут быть успешно использованы в дорожном строительстве и при отсыпке различных

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

земляных сооружений, в том числе, дамб. Известно, что строительство дорог – это затратное мероприятие, требующее значительных капиталовложений и объемов сырья. Однако, в мире имеется успешная практика применения отходов угледобычи в дорожном строительстве или при отсыпке железнодорожного полотна [1].

Отходы угледобычи состоят из различных горных пород: алюмосиликатов, глинистых сланцев, полевых шпатов, пирита, марказита и др. В составе отвальной породы широко распространены следующие химические соединения: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, TiO_2, Na_2O, K_2O, P_2O_5, а общее содержание серы не превышает 4% [3, 4]. Кроме того, имеет смысл применять горелые породы искусственного обжига (до 1000 °С) при сооружении морозостойкого и несущего слоя дорог (нижних оснований автострад) [1]. В складированной отвальной породе, в результате действия атмосферного воздуха и влаги проходят естественные процессы ее окисления и самонагревания, с последующим горением, в результате чего происходит естественный обжиг. Такие отвалы угольных шахт называют перегоревшими. Данные природные процессы позволяют применять перегоревшие отходы добычи угля без дорогостоящего искусственного обжига, что является еще одной весомой экономической составляющей применения отходов добычи угля в дорожном строительстве [1].

Все это делает возможным рассматривать породные отвалы угольных шахт как техногенное сырье для производства строительных материалов, а также активно применять углеотходы в гражданском и дорожном строительстве.

Целью работы является проведение анализа перспектив переработки отходов угледобычи в гражданском и дорожном строительстве.

Исследования проводились на примере породных отвалов восьми шахт, расположенных на территории Луганской Народной Республики. В частности, отбирались пробы отвальной породы отходов шахт в г. Стаханов («Максимовская», «шахта им. Ильича»), г. Зимогорье («Черкасская»), г. Луганск («Луганская»), г. Лутугино («Мащенская»), г. Лисичанск («Матросская»), г. Свердловск («Шахта им. М. Свердлова») и г. Антрацит («Шахта им. Г. Вахрушева»).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб отвальной породы осуществлялся согласно утвержденной в Российской Федерации методике апробирования пород отвалов [1, 5]. По данной методике, для анализа отбирался внешний поверхностный слой

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

породы – первичная проба, составляемая из порционных проб. Для этого поверхность террикона разбивалась на зоны, начиная от вершины и далее к его основанию. Для конических отвалов (терриконов) расстояние между зонами составило 4 м, а для плоских – 1 м. Зона нижнего крупноглыбового (более 1000 мм) и крупновалунного (500–1000 мм) материала опробованию не подлежала, так как современные технические средства пока не позволяют произвести качественный отбор проб.

Углеотходы значительного количества предприятий региона по своему химическому составу минеральных компонентов соответствуют требованиям к химическому составу традиционного глинистого сырья для пористых заполнителей. При этом содержание общей серы в отвальной породе на уровне $S_t^d > 3\%$ и присутствие органического углерода $C_o > 20\%$ являются существенными ограничивающими параметрами для дальнейшего использования отвальной породы, как сырья для производства. Однако, следует отметить, что содержание серы и углерода будут зависеть и от стадии метаморфизма породы. Поэтому исследование отобранных образцов отвальной породы на содержание серы (S_t^d) проводилось с учетом метаморфизации породы (по стадиям метаморфизма).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты, представленные в Табл. 1 показывают, что среднее содержание серы по всем пробам не превышает 4%. Указанное обстоятельство не является ограничительным показателем для ее переработки как строительного сырья.

Таблица 1. *Содержание общей серы (Std) в образцах отвальной породы по стадиям метаморфизма*

Table 1. *Content of total sulfur (Std) in waste rock samples by metamorphic stages*

Стадия метаморфизма отвальной породы	Содержание S_t^d, %
Слабая	3,6
Средняя	1,48
Сильная	0,57

Старые и полностью перегоревшие отвалы и терриконы содержат горелые породы высокого качества (имеют низкое содержание оксидов железа и высокое – оксидов алюминия, высокую микропористость

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

и адсорбционную активность) и могут использоваться как наполнители для мастик, заполнители в бетонах, для производства легких жаростойких бетонов, так как после автоклавной переработки приобретают прочность до 30 МПа [1].

Известно также, что отвальная порода угледобычи может быть утилизирована при производстве кремнеалюминиевых сплавов, звуко- и теплоизоляционных материалов, материалов и конструкций, имеющих высокую износостойкость [1, 6, 7].

Помимо этого, перегоревшие отвальные породы, имеющие в своем составе >14% Al_2O_3, имеют высокую жаропрочность и применимы при создании жаростойких бетонов. Поэтому интерес представляло провести исследование на определение валового содержания Al_2O_3 в образцах перегоревшей и неперегоревшей породы (Табл. 2).

Таблица 2. *Валовое содержание Al_2O_3 в исследованных образцах отвальной породы*
Table 2. *Gross Al_2O_3 content in the studied waste rock samples*

Шахта	Отвальная порода	Содержание Al_2O_3, %
г. Луганск	Неперегоревшая	13,79
г. Лисичанск	Перегоревшая	18,30
г. Антрацит		19,80
г. Свердловск		20,87

По результатам настоящей работы установлено, что перегоревшие отвальные породы угольных шахт Луганской Народной Республики могут активно применяться вместе со связующими на их основе для изготовления жаропрочных бетонов.

Проведенные исследования показывают, что горелые породы после измельчения могут добавляться в качестве наполнителей в растворы и бетоны. В угледобывающих районах Луганской Народной Республики также целесообразно применять в подземных выработках крепежные блоки из бетонов разного веса и размера, выполненных на основе горелой измельченной породы. Таким образом, угледобывающее предприятие может частично утилизировать свои отходы угледобычи для собственных строительных нужд.

Если рассматривать минеральный состав не горелых пород (свежеотсыпанную породу), то она представлена широким составом:

Received: 20.05.2024 Revised: 06.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 20.05.2024 Одобрена: 06.07.2024 Принята: 30.09.2024

песчаниками и песком, глинами, сланцами, аргиллитами, алевролитами, которые применяются как сырье для производства строительных материалов. Например, алевролиты такой породы довольно устойчивы при намокании в воде. Подробный анализ источников доказывает активное использование отходов добычи угля в промышленных масштабах для производства пористых заполнителей для бетономастик, а также для производства кирпича, так как в отвальную породу входят алюмосиликаты и до 22% Al_2O_3. Данные способы и процессы довольно хорошо проработаны в промышленных масштабах и могут использоваться повсеместно [1, 3].

Что касается сланцев и глин, входящих в состав породы, то они формируют определенную пластичность последней, что увеличивает возможность производства строительных материалов. После дополнительного измельчения углеотходов, сланцевые и глинистые компоненты проявляют свойства глинистых веществ. Результаты исследования пластичности грубо измельченной неперегоревшей и перегоревшей отвальной породы представлены в Табл. 3.

Таблица 3. *Данные по пластичности исследованной отвальной породы*
Table 3. *Data on the plasticity of the studied waste rock*

Отвальная порода	**Группа сырья по дисперсности фракций**	**Группа пластичности**	**Пластичность**		
			предел раскатывания, %	**число пластичности, %**	**нижний предел текучести, %**
Перегоревшая	Грубодисперсная	Умеренно пластичная	19,80	10,34	30,14
Неперегоревшая			20,03	11,22	31,25

По полученным результатам, касающихся пластичности различных дисперсных фракций породы (включая перегоревшую и неперегоревшую), видно, что в породе обнаруживаются литифицированные глины. В случае их тонкого измельчения (<1 мм) они вполне применимы при производстве керамических материалов [8].

Также является экономически оправданным применение отвальной пустой породы шахт и в дорожном строительстве при отсыпке автодорог, устройства тротуаров, насыпных грунтов и т.п.

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Важным фактором ограничения применения отвальной породы угольных шахт для производства стройматериалов может стать высокая радиоактивность отвальной породы [9]. Учитывая нормы радиационной безопасности при производстве строительных материалов [10], в частности из отходов добычи угля, проведено измерение удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) отобранных образцов (Табл. 4.) на основании активности цезия-137, тория-232, радия-226, калия-40 и коэффициента эманирования ($k_{эм}$) отвальной породы (Рис.) на примере угольного аргиллита шахты «Черкасская».

Таблица 4. *Результаты гамма-спектрометрического исследования образцов отвальной породы*

Table 4. *Results of gamma spectrometric study of waste rock samples*

Расположение шахты	**Место отбора образца**	**A_{Cs-137}, Бк/кг**	**A_{Th-232}, Бк/кг**	**A_{Ra-226}, Бк/кг**	**A_{K-40}, Бк/кг**	**$A_{эфф}$, Бк/кг**
г. Стаханов	шахта «Максимовская» – перегоревшая отвальная порода	0,9	29,2	29,7	306,7	**95,3**
	шахта «им. Ильича» – отвальная порода	1,5	43,9	44,8	395,1	**137,4**
г. Зимогорье	шахта «Черкасская» – аргиллит из отвала	0,5	68,3	56,1	813	**218,1**
	шахта «Черкасская» – перегоревшая отвальная порода	0,7	46,7	44,4	528,8	**152,7**
г. Луганск	шахта «Луганская» – отвальная порода	3,0	22,7	51,2	41,6	**84,5**
г. Лутугино	шахта «Мащенская» – отвальная порода	9,3	3,3	13,5	0,9	**14,8**

Показатели удельной эффективной активности породы не превышают допустимых норм [10], а результаты расчета $k_{эм}$ свидетельствуют об умеренной эманирующей способности пород угольных шахт Луганской Народной Республики, что также делает оправданным и перспективным повсеместное использование отходов добычи и обогащения угля в строительной индустрии.

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

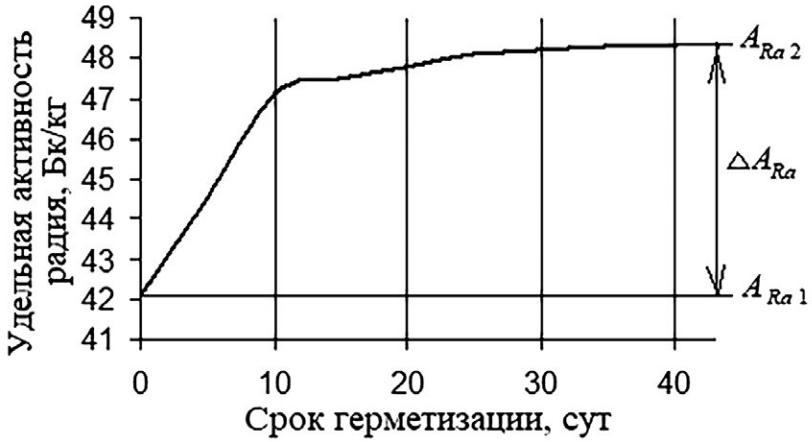


Рис. Удельная активность радия для расчета $k_{эм}$ отвальной породы шахты «Черкасская»: A_{Ra1} – удельная активность радия, измеренная в аэрированной пробе, Бк/кг; A_{Ra2} – удельная активность радия, измеренная для загерметизированной пробы после установления радиоактивного равновесия в измерительной емкости, Бк/кг

Fig. Specific activity of radium for calculating k_{em} of the dump rock of the Cherkasskaya mine: A_{Ra1} – specific activity of radium, measured in an aerated sample, Bq/kg; A_{Ra2} – specific activity of radium, measured for a sealed sample after establishing radioactive equilibrium in the measuring container, Bq/kg

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и детальный анализ различных показателей и свойств отходов угледобычи Луганской Народной Республики, включая удельную эффективную активность и коэффициент эманирования, делают возможным применение отходов угледобычи в строительной отрасли: для гражданского и дорожного строительства, а также при отсыпке различных земляных сооружений, в том числе, дамб.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей. Москва: Горное дело, ООО «Кимирийский центр», 2013.

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

2. Бабак Н.А., Масленикова Л.Л. Геоэкологический резерв промышленных минеральных отходов // Безопасность жизнедеятельности. 2018. №10 (214). С. 57–64.
3. Зубова Л. Г., Зубов А.Р., Верех-Белоусова Е.И., Олейник Н.В. Получение металлов из терриконов угольных шахт Донбасса. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2012.
4. Зборщик М.П., Осокин В.В. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений. Донецк: ДонГТУ, 1996.
5. Методика апробирования текущих отходов обогащения углей и породных отвалов шахт и углеобогатительных фабрик. Пермь: ВНИИОСуголь, 1982.
6. Ахтямов Р.Г., Сенюшкин Н.С., Суханов А.В. Разработка методики выявления потенциально опасных объектов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №5. С. 192–197. EDN: NTPIHR
7. Ахтямов Р.Г. Оценка и пути уменьшения экологической опасности объектов автотранспортной инфраструктуры урбанизированной территории: автореферат дисс. … канд. техн. наук. Казань, 2009. EDN: NLFGLX
8. Баталин Б.С., Белозерова Т.А., Гайдай М.Ф. Строительная керамика из терриконников Кизеловского угольного бассейна // Стекло и керамика. 2014. Т. 87. № 3. С. 8–10.
9. Зубова Л.Г., Зубов А.Р. Оценка радиоактивности породных отвалов угольных шахт ПАО «Лисичанскуголь» // Уголь Украины. 2016. №2. С. 59–65.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1.2612-10): зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 18115 Москва: Минюст России, 2010.

REFERENCES

1. Shpirt MYa, Artemyev VB, Silyutin SA. *Use of solid waste from coal mining and processing.* Moscow: Mining, LLC Kimiriysky Center; 2013. (In Russ.)
2. Babak NA, Maslenikova LL. Geoecological Rezerve of Industrial Mineral Wastes. *Life safety.* 2018;10(214):57–64. (In Russ.)
3. Zubova LG, Zubov AR, Vereh-Belousova EI, Oleinik NV. *Obtaining metals from waste heaps of Donbass coal mines: monograph.* Lugansk: V Dahl East Ukrainian national university; 2012. (In Russ.)
4. Zborshchik MP, Osokin VV. *Prevention of environmentally harmful manifestations in the rocks of coal deposits.* Donetsk: DonGTU; 1996. (In Russ.)
5. *Methodology for testing current waste from coal processing and rock dumps from mines and coal processing plants.* Perm: VNIIOSugol; 1982. (In Russ.)
6. Ahtyamov RG, Senyushkin NS, Suhanov AV. Elaboration of potentially dangerous objects recognition principles. *Bulletin of the Voronezh State Technical University.* 2011;7(5):192–197. (In Russ.) EDN: NTPIHR
7. Ahtyamov RG. *Assessment and ways to reduce the environmental hazard of motor transport infrastructure objects in an urbanized area* [abstract of dissertation]. Kazan; 2009. (In Russ). EDN: NLFGLX

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

8. Batalin BS, Belozerova TA, Gaidai MF. Construction ceramics made from Kizelovskiy coal field refuse. *Glass and Ceramics.* 2014;87(3):8–10. (In Russ.)
9. Zubova LG, Zubov AR. Assessment of radioactivity of rock dumps of coal mines of PJSC "Lisichanskugol". *Ukrainian coal.* 2016;2:59–65. (In Russ.)
10. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010): (Ionizing radiation, radiation safety SP 2.6.1.2612-10): registered on August 11, 2010. Registration No. 18115; 2010. (In Russ.)

Сведения об авторах:
Верех-Белоусова Екатерина Иосифовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии и инновационных химических технологий;
eLibrary SPIN: 4623-1246;
E-mail: kate3152@yandex.ru
Харламова Алина Вадимовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»;
eLibrary SPIN: 6997-5427; ORCID: 0009-0008-5786-1203;
E-mail: alavina@yandex.ru

Information about the authors:
Ekaterina I. Verekh-Belousova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Innovative Chemical Technologies;
eLibrary SPIN: 4623-1246;
E-mail: kate3152@yandex.ru
Alina V. Kharlamova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere and Environmental Safety;
eLibrary SPIN: 6997-5427; ORCID: 0009-0008-5786-1203;
E-mail: alavina@yandex.ru

Received: 20.05.2024 **Revised: 06.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 20.05.2024 **Одобрена: 06.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

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

https://doi.org/10.17816/transsyst630992

© А.А. Махонько[1], Ю.Г. Лазарев[2], А.А. Антонюк[3]
[1] ООО «ОСА-Север»
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[3] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ТЕХНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВАНТОВОГО МОСТА ЧЕРЕЗ ПЕТРОВСКИЙ КАНАЛ В СТВОРЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «ЗАПАДНЫЙ СКОРОСТНОЙ ДИАМЕТР» В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Цель. Анализ работы действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные.

Материалы и методы. Для получения результатов используются статистические данные действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках настоящего 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 проблемы возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометры фиксируют ускорения колебаний, превышающие предельные значения. Предложена оценка надежности системы мониторинга инженерных конструкций путем классификации полученных данных с акселерометра на две группы. Определена перспектива дальнейших исследований для более детального изучения причин возникновения проблемы.

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 состоянием; объект транспортной инфраструктуры; вантовый мост; напряженно-деформированное состояние; акселерометр; вибрационный мониторинг.

Как цитировать:
Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А. Технический аспект работы акселерометров в составе системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 401–418. doi: 10.17816/transsyst630992

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© A.A. Makhonko[1], Y.G. Lazarev[2], A.A. Antonyuk[3]
[1] Highway Operator Nord, LLC
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
[3] Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

TECHNICAL ASPECT OF THE OPERATION OF ACCELEROMETERS AS COMPOSITION OF A SYSTEM FOR MONITORING ENGINEERING STRUCTURES OF A CABLE-STAYED BRIDGE OVER THE PETROVSKY CANAL IN THE CONSTRUCTION OF THE WESTERN SPEED DIAMETER HIGHWAY IN ST. PETERSBURG

Aim. This study analyzes the current monitoring system for the engineering structures of a cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal, part of the Western High-Speed Diameter highway in St. Petersburg, focusing on emergency situations where accelerometers on pylons record values that exceed limits.

Methods and Materials. The study utilizes statistical data from existing monitoring system databases. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying theoretical scientific methods including analytical techniques, mathematical statistics, and induction.

Results. The analysis presents an overview of the current system used for monitoring engineering structures and highlights issues related to emergency situations in which accelerometer readings exceed threshold values. This study proposes a method for assessing the reliability of the monitoring system by classifying the data obtained from the accelerometer into two groups. The research identifies the need for further investigations to understand the root causes of these issues.

Conclusion. The results can assist in the design 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 structural technical condition assessments.

Keywords: structural artificial monitoring; technical condition management; transport infrastructure object; cable-stayed bridge; stressed-deformed condition; accelerometer; vibration monitoring.

To cite this article:
Makhonko AA, Lazarev YG, Antonyuk AA. Technical aspect of the operation of accelerometers as composition of a system for monitoring engineering structures of a cable-stayed bridge over the Petrovsky canal in the construction of the Western Speed Diameter highway in St. Petersburg. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):401–418. doi: 10.17816/transsyst630992

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Система мониторинга инженерных конструкций (СМИК) 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 [1–6].

Использование СМИК является обязательным условием при реализации любого объекта транспортной инфраструктуры, относящегося к внеклассным сооружениям, к которым, в свою очередь, относятся вантовые мосты. Система мониторинга инженерных конструкций реализуется для обеспечения требуемого уровня безопасности, в том числе снижением риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде.

Основным показателем работоспособности СМИК является ее надежность, а именно свойство системы сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в соответствии с заданными целями и условиями применения. При высокой степени надежности системы уменьшается риск возникновения нештатных ситуаций, который, в свою очередь, может привести к аварийным ситуациям, т.е. состояниям эксплуатируемого объекта, которые характеризуются нарушением пределов и (или) условий безопасности эксплуатации, при которых все неблагоприятные влияния источников опасности на персонал, население и окружающую среду удерживаются в приемлемых пределах посредством соответствующих технических средств, предусмотренных проектом. Иными словами, система мониторинга инженерных конструкций должна обеспечивать возможность детальной оценки технического состояния сооружения в момент наступления нештатных ситуаций с последующей оценкой рисков в кратчайшие сроки для недопущения ухудшения потребительских свойств мостового сооружения [7–10].

При использовании действующей СМИК вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге авторами неоднократно была зафиксирована нештатная ситуация, при которой датчиками-акселерометрами, расположенными в верхних точках пилонов, фиксируются значения, превышающие предельно допустимые.

В данной статье изучен вопрос возникновения исследуемой проблемы, проведен статистический анализ и составлен план для детального

Received: 23.06.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.06.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

изучения причин возникновения явления с последующей оптимизацией и усовершенствованием действующей системы мониторинга инженерных конструкций.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При мониторинге конструкций вантового моста особое внимание следует уделять динамическим воздействиям и анализу причин их возникновения. Необходимо оценивать элементы сооружения, которые наиболее податливы к динамическим нагрузкам: пилоны, пролетное строение [11–13].

В действующей системе мониторинга инженерных конструкций за сбор и оценку динамических показателей отвечает подсистема изменения динамических показателей. На Рис. 1 представлена схема расположения акселерометров на вантовом мосту.

В свою очередь, в подсистему изменения динамических показателей входят акселерометры, расположенные в верхних точках пилонов, в середине и в четверти пролетных строений.

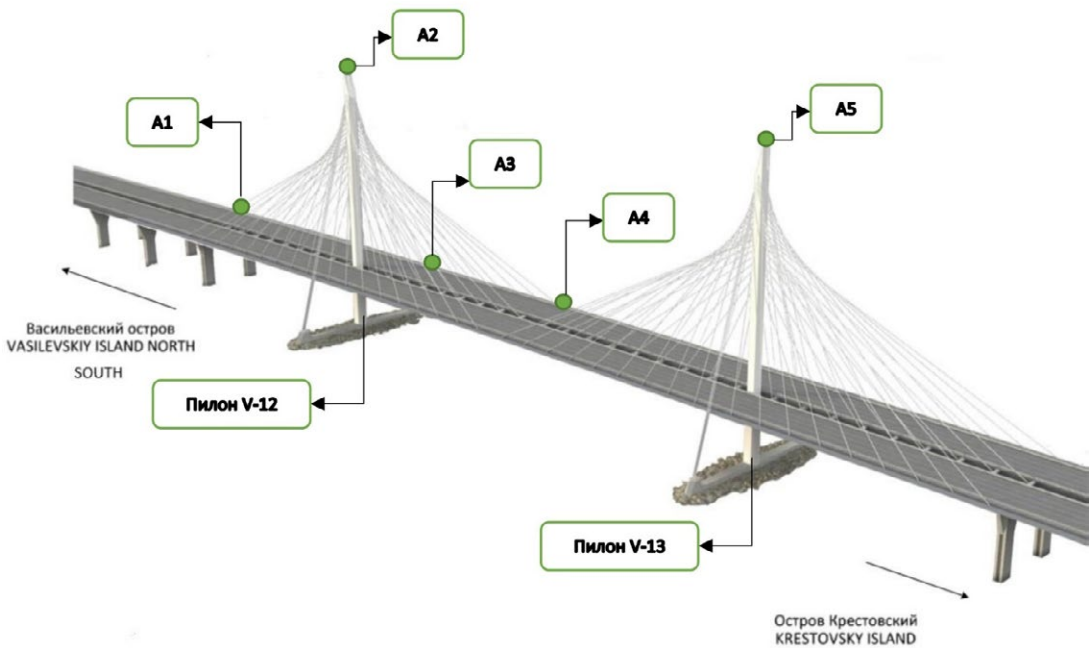


Рис. 1. Схема расположения акселерометров на вантовом мосту через Петровский канал

Fig. 1. Scheme of accelerometers location on the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal

Received: 23.06.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.06.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

Подсистема изменения динамических показателей выдает динамические параметры сооружений в виде наборов ускорений колебаний при помощи акселерометров. 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 нештатной ситуации, когда датчик фиксирует значения, превышающие предельные, запись показаний производится с частотой 50 Гц с временным интервалом в 10 минут [14–17].

На Рис. 2 показан график изменения ускорений колебаний пилона при значениях, превышающих предельные.

При эксплуатации действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге авторами неоднократно замечались нештатные ситуации, связанные с фиксацией ускорений колебаний пилонов, превышающих предельные значения. В следующем разделе приведена оценка надежности подсистемы изменения динамических показателей, основанная на разделении полученных данных ускорений колебаний на две группы [18–19].

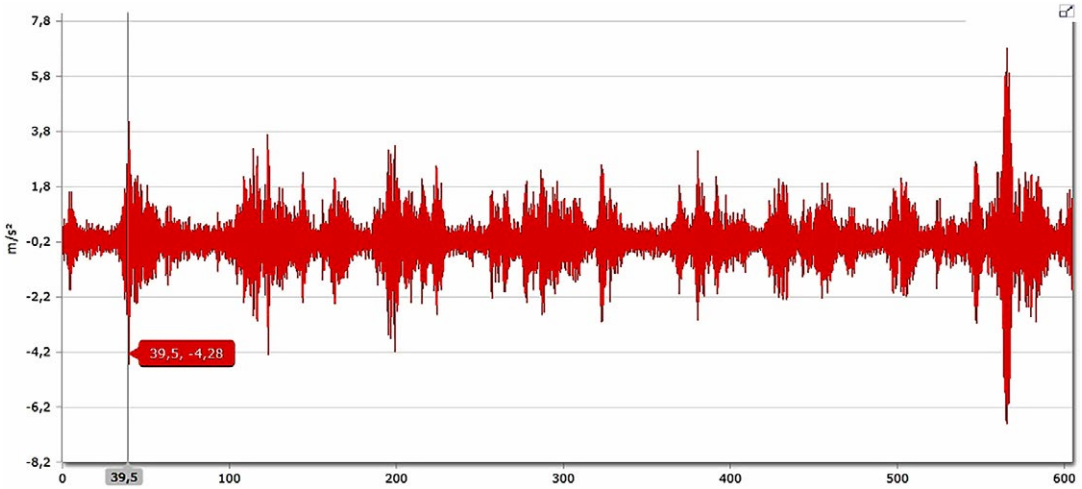


Рис. 2. График изменения ускорений колебаний на пилоне при превышение предельных значений

Fig. 2. Graph of change of vibration accelerations on the pylon at exceeding the limit values

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Анализ полученных ускорений колебаний показал, что все нештатные ситуации можно разделить на две группы.

К первой группе относятся случаи, в которых срабатывание аварийной системы вызвано динамическим воздействием на сооружение.

На Рис. 3 представлен график изменения ускорений колебаний пилона V-12 вдоль оси Y, полученных акселерометром А2. Горизонтальными линиями показаны пороговые значения ускорений (+/-2,5 м/с^2), которые были посчитаны в расчетной модели при проектировании.

На представленном графике отсутствуют локализованные области резкого изменения значений ускорений, что свидетельствует о наполненности сигнала. Для подтверждения того, что срабатывание системы обосновано в конкретном случае, возможно использовать метод анализа, основанного на теории вероятности. Для это следует построить функцию плотности вероятности случайных величин для рассматриваемого сигнала, которая представлена на Рис. 4.

Из графика видно, что распределение близко к нормальному с около нулевым значением математического ожидания. Весь диапазон регистрируемых ускорений (от -5 м/с^2 до +5м/с^2) является равномерно

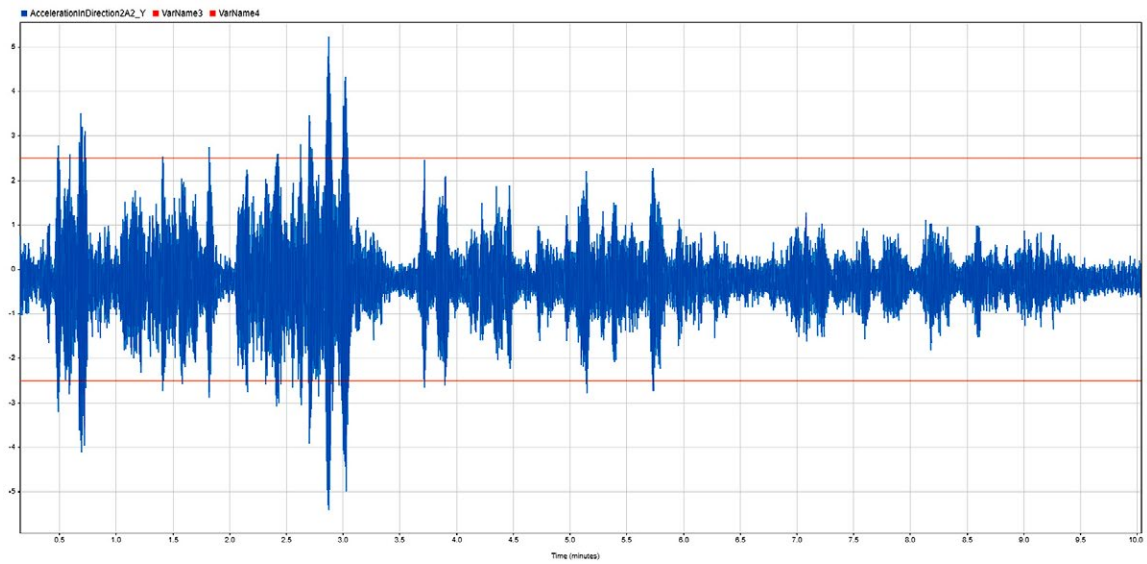


Рис. 3. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12, полученных акселерометром А2

Fig 3. Graph of change of vibration accelerations on the V-12 pylon obtained from accelerometer A2

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рис. 4. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра A2

Fig 4. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A2

заполненным, о чем можно судить по сливающимся оранжевым точкам на графике Рис. 4. В окрестностях экстремальных значений есть некоторое количество отдельно стоящих точек, что может свидетельствовать о наличии случайных ошибок в процессе измерений. Несмотря на это, можно считать, что срабатывание аварийной системы в данном случае является обоснованным, поскольку статистически достоверные данные значения экстремальных ускорений лежат за пределами пороговых значений.

Для наглядности приводится еще один пример обоснованного срабатывания системы на пилоне V-13 (акселерометр A5), показанный на Рис. 5 и 6.

Стоит отметить, что в данном случае количество случайных выбросов несколько выше, однако, срабатывание аварийной системы все еще можно считать обоснованным.

Ко второй группе случаев срабатывания аварийной системы относятся нештатные ситуации, когда срабатывание системы вызвано ошибками/сбоями в работе акселерометров, которые в дальнейшем будем обозначать термином – выброс.

Пример такого срабатывания системы показан на Рис. 7. Хорошо видно, что пороговые значения превышаются только отдельными сильно локализованными экстремумами значений ускорений.

Строгий вывод о том, что превышение пороговых значений возникло в результате выбросов, также может быть сделан при использовании методов анализа, основанных на теории вероятности. На Рис. 8 представлен график функции плотности вероятности для описываемого сигнала.

Received: 23.06.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 23.06.2024 Одобрена: 30.07.2024 Принята: 30.09.2024

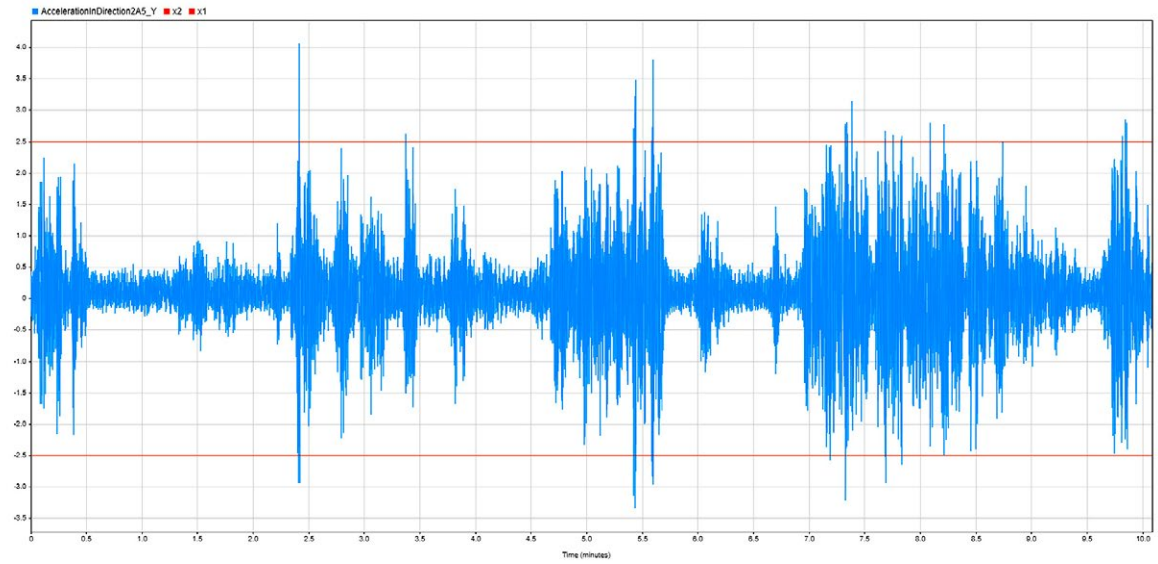


Рис. 5. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-13, полученных акселерометром А5

Fig 5. Graph of the change in vibration accelerations on the V-13 pylon obtained from accelerometer A5

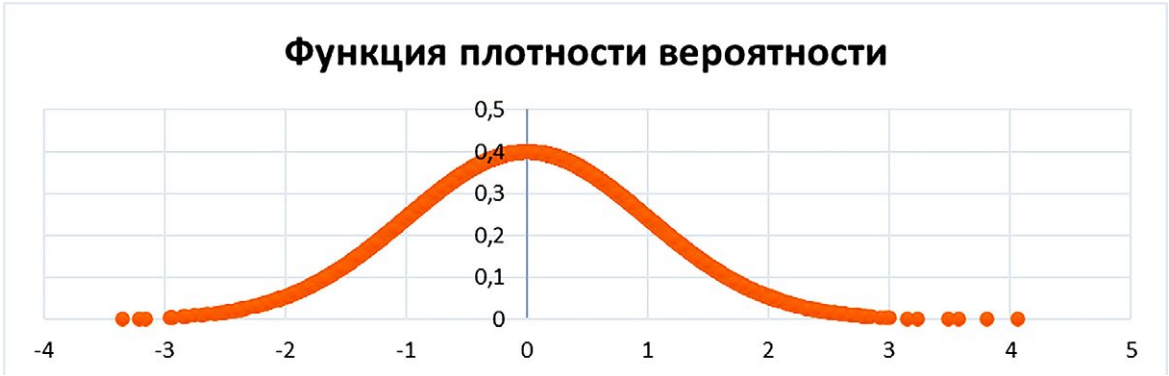


Рис. 6. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра А5

Fig 6. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A5

Из графика видно, что функция плотности вероятности заполнена только в центральной околонулевой части. Область максимальных ускорений описывается одной точкой, область минимальных значений – 3 точками из диапазона от минус 2 до минус 9 м/с^2 (-2 м/с^2 – -9 м/с^2).

Далее приведен статистический анализ нештатных ситуаций за весь период эксплуатации.

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

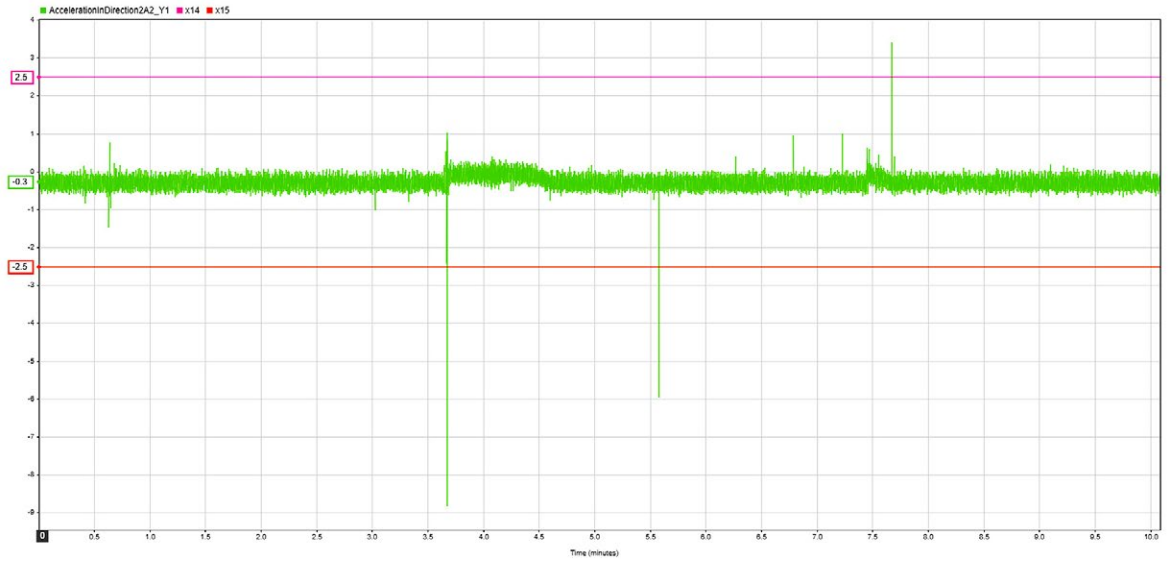


Рис. 7. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12, полученных акселерометром А2

Fig 7. Graph of change of vibration accelerations on the V-12 pylon obtained from accelerometer A2

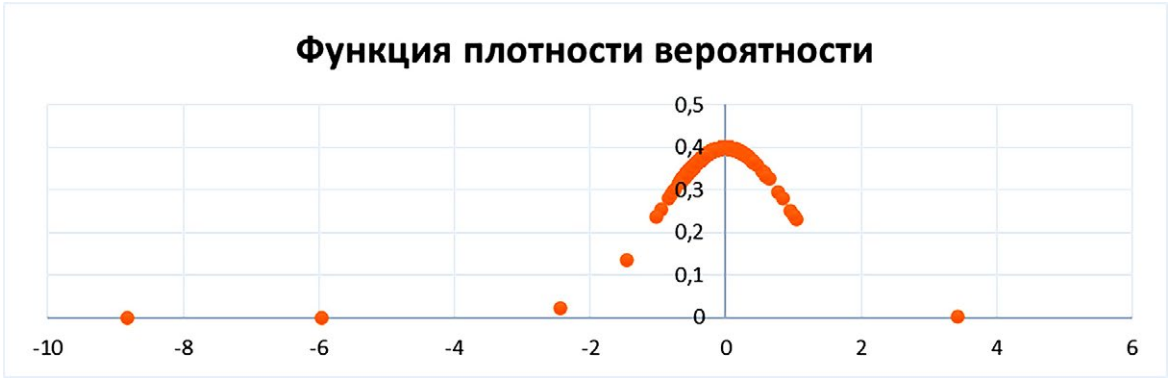


Рис. 8. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала акселерометра А2

Fig 8. Probability density function of random variables for the signal from accelerometer A2

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА ПИЛОНАХ

Статистический анализ производился по полученным данным акселерометров, расположенных в верхних точках пилонов за весь период эксплуатации вантового моста. За период с 08.2017 по 05.2023 включительно произошло 671 срабатывание аварийной системы.

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Для детальной проработки весь статистический анализ разбивается на 3 этапа. На 1 этапе оценивались количественные показатели срабатываний по каждому из датчиков. После данной операции производился анализ даты и времени для определения времени года и времени суток, чтобы оценить зависимость срабатывания системы от температуры окружающей среды и интенсивности временной нагрузки, которая значительно изменяется в часы пик.

В Табл. 1 приведена выкладка результатов по 1 этапу статистического анализа.

Таблица 1. *Результаты статистического анализа 1 этап*
Table 1. *Results of statistical analysis stage 1*

№ п/п	Сработавший акселерометр		Время года				Время суток			
	A2	A5	Лето	Осень	Зима	Весна	Утро	День	Вечер	Ночь
1.	448	223	–	–	–	–	–	–	–	–
2.	–	–	217	132	178	144	–	–	–	–
3.	–	–	–	–	–	–	104	234	213	120
Общее количество срабатываний			671							

Из результатов видно, что превалирует срабатывание акселерометра A2, расположенного на пилоне V-12, в большей степени в дневное время в летний период, что свидетельствует о влиянии

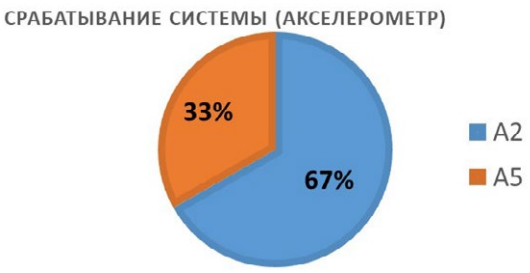


Рис. 9. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы между акселерометров A2 и A5

Fig 9. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations between accelerometers A2 and A5

Рис. 10. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы по временам года

Fig 10. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations by season

Received: 23.06.2024
Поступил: 23.06.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

Рис. 11. Диаграмма результатов. Процентное соотношение количеств срабатываний системы по времени суток

Fig 11. Results diagram. Percentage ratio of the number of system activations by time of day

температуры окружающей среды на срабатывание аварийной системы. Также стоит сделать вывод, что на срабатывание системы не влияет интенсивность временной нагрузки, так как максимальная интенсивность движения по вантовому мосту происходит в утренние часы.

На этапе 2 статистического анализа производилась классификация обрабатываемых данных по двум группам срабатывания аварийной системы, описанных выше. Из полученных результатов, отраженных в Табл. 2, следует, что обоснованное срабатывание аварийной системы фиксируется акселерометром А2 в зимний период в дневное и вечернее время суток и составляет 22,95% от общего числа срабатываний системы, что подтверждает выводы, сделанные по 1 этапу анализа и указывает на необходимость проведения 3 этапа статистического анализа, связанного с оценкой влияния ветрового потока.

Таблица 2. *Результаты статистического анализа 2 этап*
Table 2. *Results of statistical analysis stage 2*

№ п/п	Сработавший акселерометр		Время года				Время суток			
	А2	А5	Лето	Осень	Зима	Весна	Утро	День	Вечер	Ночь
1.	113	41	–	–	–	–	–	–	–	–
2.	–	–	3	54	72	25	–	–	–	–
3.	–	–	–	–	–	–	32	47	47	28
Кол-во обоснованных срабатываний			154							
% обоснованных срабатываний			22,95%							
% выбросов			77,05%							

Received: 23.06.2024
Поступил: 23.06.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

Из-за повышенной чувствительности к ветровым нагрузкам необходимо оценить влияния ветрового потока на срабатывание аварийной системы. Для оценки использовались два параметра ветрового потока: скорость и направление. Для наглядности построена роза ветров для 1 группы срабатывания аварийной системы, а также для каждого акселерометра по отдельности. Данные графики представлены на Рис. 12–14. Стоит отметить, что результаты измерений анеморумбометром в СМИК отображаются из учета встречного направления ветра – от края к центру графика.

По результатам анализа розы ветров следует, что обоснованные срабатывания аварийной системы на акселерометре А2 происходят при направлении ветра Север-Северо-восток (0–45 градусов) и Север-Западное направление (315–337,5 градусов), а для акселерометра А5 – Юг-Юго-восток-Юго-запад (157,5–202,5 градусов). Иными словами, на пилон V-12, расположенный на Юге, влияние оказывает северное направление ветра, а на пилон V-13, находящийся на Севере, – Южное. При этом средняя скорость ветра варьируется в диапазоне 15–16 м/с.

ВЫВОДЫ

Авторами проанализирована работа действующей системы мониторинга инженерных конструкций на вантовом мосту через Петровский

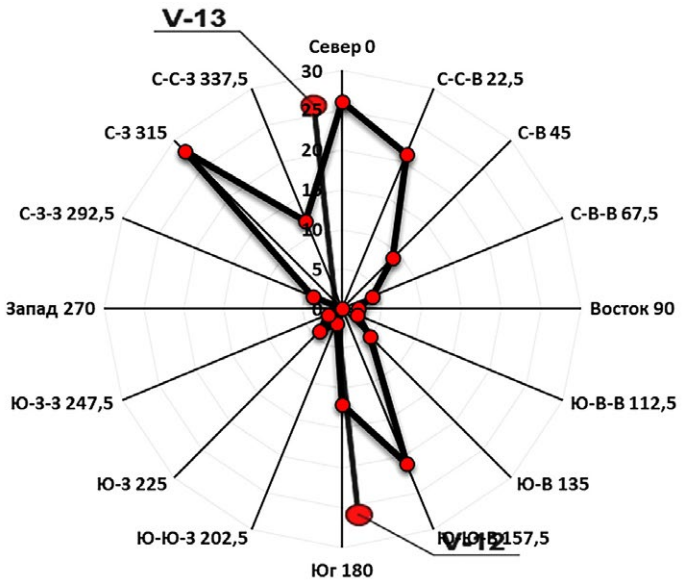


Рис. 12. Роза ветров по 1 группе срабатывания (общий)

Fig 12. Wind rose by 1 triggering group (general)

Received: 23.06.2024
Поступил: 23.06.2024
Revised: 30.07.2024
Одобрена: 30.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

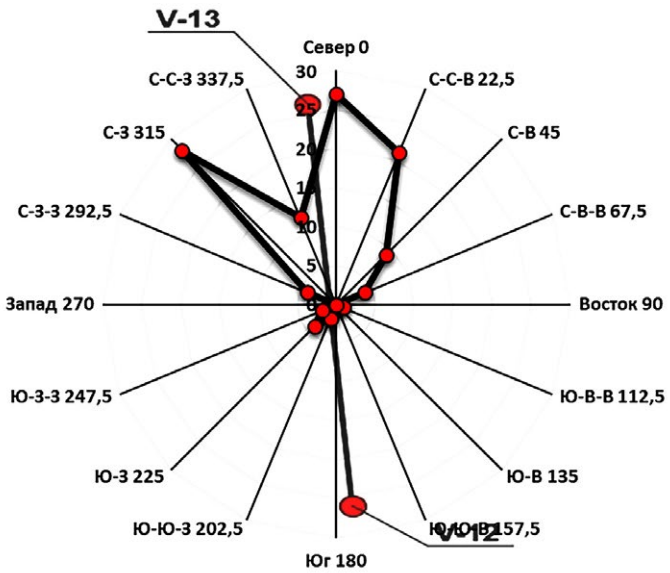


Рис. 13. Роза ветров по 1 группе срабатывания (акселерометр А2)

Fig 13. Wind rose by 1 triggering group (accelerometer A2)

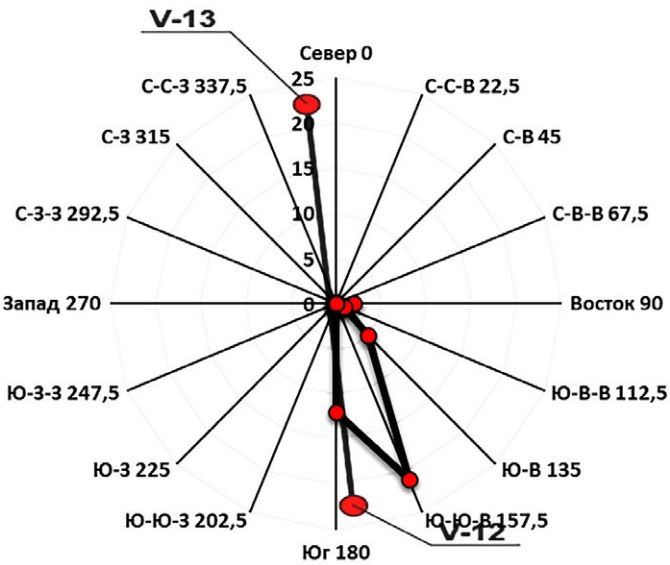


Рис. 14. Роза ветров по 1 группе срабатывания (акселерометр А5)

Fig. 14. Wind rose by 1 triggering group (accelerometer A5)

канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные.

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Анализ данных, представленный в статье, позволяет сделать следующие выводы:

1. В большинстве случаев (77,05%) причиной срабатывания аварийной система СМИК являются выбросы – физически не обоснованные превышения пороговых значений, возникающие из-за ошибок в работе измерительных систем.
2. При анализе было получено, что на количество выбросов оказывает влияние температура окружающей среды. Для подтверждения гипотезы необходимо провести натурный эксперимент по измерению температуры в конструкции пилона в месте расположения акселерометра в самый жаркий период времени.
3. В 22,95% случаях установлено, что причины срабатывания аварийной системы СМИК являются физически обоснованными. При этом направление ветра и его скорость, измеренная анеморумбометром в верхней точке пилона, позволяют предположить, что возбуждение конструкции вызвано откликом на турбулентный ветровой поток или срывы вихрей.
4. Для дальнейшего выяснения причин колебаний пилонов необходимо произвести расчеты частот собственных колебаний по полученным данным ускорений и сравнить с проектными значениями.
5. Для адекватной оценки текущего состояния вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге необходимо уменьшить количество выбросов. Для решения этой задачи коллективом авторов принято решение о разработке методики оценки работоспособности систем мониторинга инженерных конструкций с учетом синхронизации работы датчиков СМИК.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 59943-2021. Дороги общего пользования. Системы мониторинга мостовых сооружений. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. (In Russ.)]. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200182099

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

2. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. М.: МАДИ, 2021. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf
3. Махонько А.А., Мальков А.В., Белый А.А., Антонюк А.А. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2023. № 56(82). С. 68–77.
4. 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
5. Карапетов Э.С., Белый А.А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век». 2008. № 4. С. 80–83. EDN: KZPOXH
6. Васильев А.И. Мониторинг мостовых сооружений. Задачи, возможности, проблемы // Дорожная держава. 2008. № 11. С. 80–82. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf
7. 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. EDN: ZWDQBR
8. 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. Дата обращения: 20.04.2024. Режим доступа: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285
9. 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. IEEE, 2018. P. 176–183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743
10. 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. EDN: NAXYBX
11. 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. Т.19, № 2. С. 120–128. EDN: JTGPFD
12. Белый А.А., Ященко А.И., Антонюк А.А. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. 2020. № 45(71). С. 38–45. EDN: ZDBIAB
13. Гарамов О.В. Длительный приборный мониторинг автодорожных мостов. Проблемы и перспективы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2004. № 1. С. 27–31. EDN: LRHUMR

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

14. Сырков А.В. Пути развития автоматизированных систем эксплуатации и содержания автодорожных искусственных сооружений // Автоматизация в промышленности. 2014. № 2. С. 34–38. EDN: RVDMQP
15. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. СПб: ПГУПС, 2016.
16. 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. EDN: PCNRCP
17. 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. EDN: YOTBML
18. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г., Антонюк А.А. Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, № 2. С. 421–431. doi: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431
19. Махонько А.А., Лазарев Ю.Г. Выбор способа фильтрации данных акселерометров системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2024. № 59 (85) С. 66–73. EDN: DPGFVG

REFERENCES

1. State Standard 59943-2021. Automobile roads of general use. Systems of monitoring bridges. Design rules. FGBU “RST”; 2022. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: https://docs.cntd.ru/document/1200182099
2. Vasil’ev AI. *Monitoring tehnicheskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij.* Moscow: MADI; 2021. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf
3. Makhonko AA, Malkov AV, Belyi AA, Antonyuk AA. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobilnoj dorogi “Zapadnyj skorostnoj diametr” v Sankt-Peterburge. *Putevoi navigator.* 2023;56(82);68–77. (In Russ.)
4. 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. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239283-96
5. Karapetov JeS, Belyj AA. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy. *Vestnik “Zodchij.* 21 vek”. 2008; 4;80–83 (In Russ.) EDN: KZPOXH

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

6. Vasil'ev AI. Monitoring mostovyh sooruzhenij. Zadachi, vozmozhnosti, problem. *Dorozhnaja derzhava.* 11/2008. 2008;(11):80–82. (In Russ.) Accessed: 20.04.2024. Available from: https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel21E560.pdf
7. 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.) EDN: ZWDQBR
8. 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.) Accessed: 20.04.2024. Available from: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/284/285
9. 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.* IEEE; 2018:176–183. doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524743
10. Bryn MYa, Nikitchin AA, Tolstov EG. Geodesic monitoring of railway transport infrastructure objects. *Transport Rossijskoj Federacii.* 2010;4 (29);58–60. (In Russ.) EDN: NAXYBX
11. 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.) EDN: JTGPFD
12. Belyi AA, Belov AA, Jashhenko AI, Antonyuk AA. Integralny monitoring mosta Aleksandra Nevskogo. *Putevoi navigator.* 2020;45(71);38–45. (In Russ.) EDN: ZDBIAB
13. Garamov OV. Dlitel'nyi pribornyi monitoring avtodorozhnykh mostov. Problemy i perspektivy. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2004;1;27–31 (In Russ.) EDN: LRHUMR
14. Syrkov AV. Puti razvitija avtomatizirovannyh sistem jekspluatacii i soderzhanija avtodorozhnyh iskusstvennyh sooruzhenij. *Avtomatizacija v promyshlennosti.* 2014;2;34-38. (In Russ.) EDN: RVDMQP
15. Efanov DV. *Funkcionalniy kontroli monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki.* St. Petersburg: PGUPS; 2016. (In Russ.)
16. 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.) EDN: PCNRCP
17. Belyi AA, Belov AA, Osadchik GV, Dolinsky KYu. 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) EDN: YOTBML
18. Makhonko AA, Lazarev YuG, Antonyuk AA. Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2024;21(2):421–431. (In Russ.) doi: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

19. Makhonko AA, Lazarev YG. Vybor sposoba fil'tracii dannyh akselerometrov sistemy monitoringa inzhenernyh konstrukcij vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v g. Sankt-Peterburge. *Putevoi navigator.* 2024;59(85);66–73. (In Russ.) EDN: DPGFVG

Сведения об авторах:
Махонько Андрей Андреевич, начальник отдела дорожного надзора;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Лазарев Юрий Георгиевич, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0002-5616-1191;
E-mail: lazarev_yug@spbstu.ru
Антонюк Анатолий Анатольевич, инженер-исследователь;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Information about the authors:
Andrey Makhonko, head of construction supervision department;
eLibrary SPIN: 3629-3734; ORCID: 0009-0003-6763-2811;
E-mail: makhonkoaa@gmail.com
Yurij Lazarev, Doctor of Sciences in Engineering, Professor;
eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0002-5616-1191;
E-mail: lazarev_yug@spbstu.ru
Anatoly Antonyuk, engineer;
eLibrary SPIN: 4469-8646; ORCID: 0000-0001-7169-6592;
E-mail: aaa.12.03.1992@mail.ru

Received: 23.06.2024 **Revised: 30.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 23.06.2024 **Одобрена: 30.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

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

https://doi.org/10.17816/transsyst635339

© Д.Н. Смердов
Сибирский государственный университет путей сообщения
(Новосибирск, Россия)

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Обоснование. Систематизированы принципы применения полимерных композиционных материалов при проектировании мостовых сооружений. Представлены основные принципы расчета несущих конструкций пролетных строений мостов с элементами из полимерных композиционных материалов.

Цель. Повышение прочности и долговечности пролетных строений мостов при их строительстве и содержании с учетом оптимизации затрат на основе применения полимерных композиционных материалов.

Материалы и методы. Современный подход к проектированию конструкций мостовых сооружений, математическая статистика обработки результатов экспериментальных исследований, использование численных методов расчета мостовых конструкций с применением нелинейных деформационных моделей анизотропных материалов.

Результаты. Разработаны принципы проектирования пролетных строений мостов с элементами из полимерных композиционных материалов, включающие способы усиления и армирования железобетонных конструкций мостов полимерными композиционными материалами с учетом особенностей их работы под воздействием длительных постоянных и временных нагрузок, пониженных и повышенных температур, а также методы проектирования цельнокомпозитных пролетных строений пешеходных и автодорожных мостов.

Заключение. Принципы проектирования пролетных строений мостов с элементами из полимерных композиционных материалов внедрены в практику транспортного строительства Российской Федерации. Подтверждена техническая и экономическая эффективность применения полимерных композиционных материалов в мостовых сооружениях транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: строительные нормы и правила; мост; пролетное строение; углеродное волокно; полимерные композиционные материалы; железобетонный элемент; пултрузионный профиль; стеклопластик; несущая способность; модуль упругости; усиление; метод конечных элементов; прочность; жесткость; деформация.

Как цитировать:
Смердов Д.Н. Систематизация применения полимерных композиционных материалов при проектировании мостовых сооружений // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10, № 3. С. 419–434. doi: 10.17816/ transsyst635339

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH
Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© D.N. SMERDOV
Siberian State Railway University
(Novosibirsk, Russia)

SYSTEMATIZATION OF THE APPLICATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE DESIGN OF BRIDGE STRUCTURES

Background. This study systematizes the principles of using polymer composite materials in bridge structure design, outlining the fundamental principles for calculating load-bearing structures of bridge spans featuring these materials.

Aim. The goal is to enhance the strength and durability of bridge spans during construction and maintenance, while optimizing costs through the use of polymer composite materials.

Materials and Methods. The research employs a modern approach to bridge structure design, utilizing mathematical statistics for experimental data analysis and numerical methods for calculating bridge structures using nonlinear deformation models of anisotropic materials.

Results. Developed principles for designing bridge spans with polymer composite elements include methods for strengthening and reinforcing concrete bridge structures. These methods account for operational factors such as long-term constant and temporary loads, low and elevated temperatures, as well as methods for designing all-composite spans pedestrian and road bridges

Conclusion. The principles of designing bridge spans with elements made of polymer composite materials have been introduced into the practice of transport construction in the Russian Federation. The technical and economic efficiency of using polymer composite materials in bridge structures of transport infrastructure has been confirmed.

Keywords: building codes; bridge; superstructure; carbon fiber; polymer composite materials, reinforced concrete element; pultruded profile; fiberglass; load-bearing capacity; modulus of elasticity; reinforcement; finite element method; strength; stiffness; deformation.

To cite this article:
Smerdov DN. Systematization of the application of polymer composite materials in the design of bridge structures. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3): 419–434. doi: 10.17816/ transsyst635339

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований по применению полимерных композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений транспортной инфраструктуры позволил систематизировать область их использования при новом строительстве, реконструкции, ремонте и капитальном ремонте мостов [1–7]. В целом, область использования полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве можно разделить на три основных направления. К первому направлению можно отнести композиционные материалы, используемые в качестве составных элементов несущих конструкций мостов, например, внешнее армирование при усилении железобетонных конструкций пролетных строений и опор [8], армирование бетона. Ко второму – композиционные материалы, используемые в качестве материала, из которого изготавливают основные несущие конструкции мостов – цельнокомпозитные конструкции пролетных строений, несущие элементы ферм или главных балок. К третьему – композиционные материалы, используемые для изготовления эксплуатационных обустройств – водоотводные лотки, перильные ограждения тротуаров, основания дорожных знаков [9].

Во всех реализуемых видах строительства существует возможность применения полимерных композиционных материалов при производстве как новых несущих конструктивных элементов мостов, например бетонных со смешенным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, цельнокомпозитных конструкций пролетных строений, так и при ремонте существующих эксплуатируемых несущих конструкций путем их внешнего армирования полимерными композиционными материалами, а для обустройства элементов мостового полотна и коммуникаций установку перильных ограждений тротуаров, водоотводных и коммуникационных лотков из композиционных профилей. Соответственно при проектировании конструкций мостов должен применяться новый подход, который обеспечит повышение их прочности и долговечности как на железных, так и на автомобильных дорогах при их строительстве и содержании на основе применения полимерных композиционных материалов. На Рис. 1 представлена организационная блок-схема, систематизирующая принципы использования полимерных композиционных материалов при строительстве, реконструкции, ремонте и капитальном ремонте мостов, а на Рис. 2 и 3 показаны соответствующие модули проектирования в зависимости от вида строительства.

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

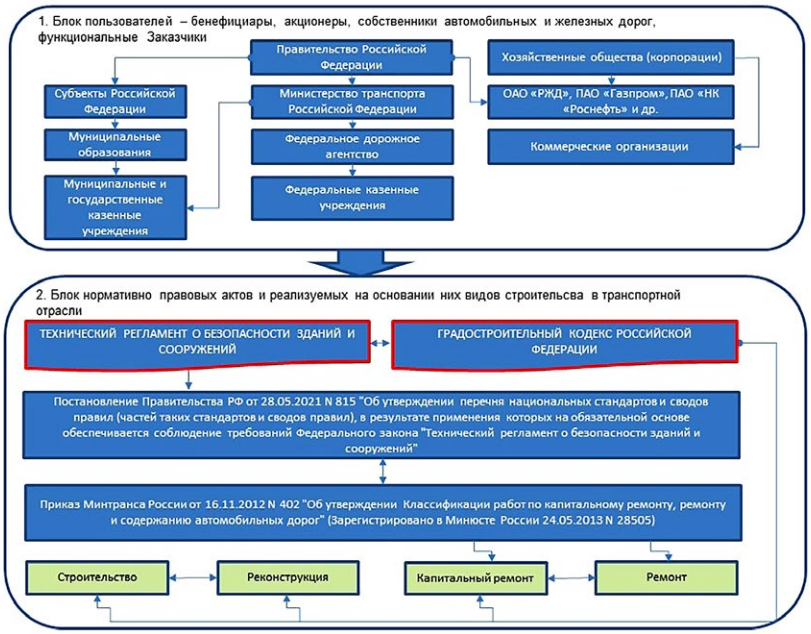


Рис. 1. Организационная схема применения полимерных композиционных материалов при строительстве, реконструкции, ремонте и капитальном ремонте железобетонных мостов

Fig. 1. Organizational diagram of the use of polymer composite materials in the construction, reconstruction, repair and major repairs of reinforced concrete bridges

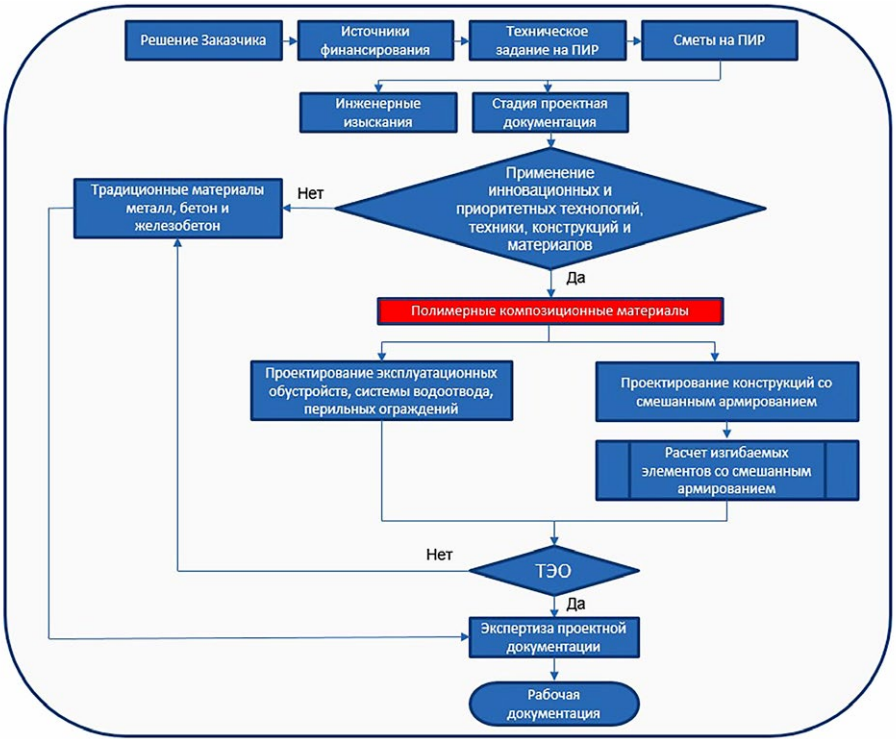


Рис. 2. Алгоритм модуля проектирования строительства, реконструкции мостов

Fig. 2. Algorithm of the design module for construction, reconstruction of bridges

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

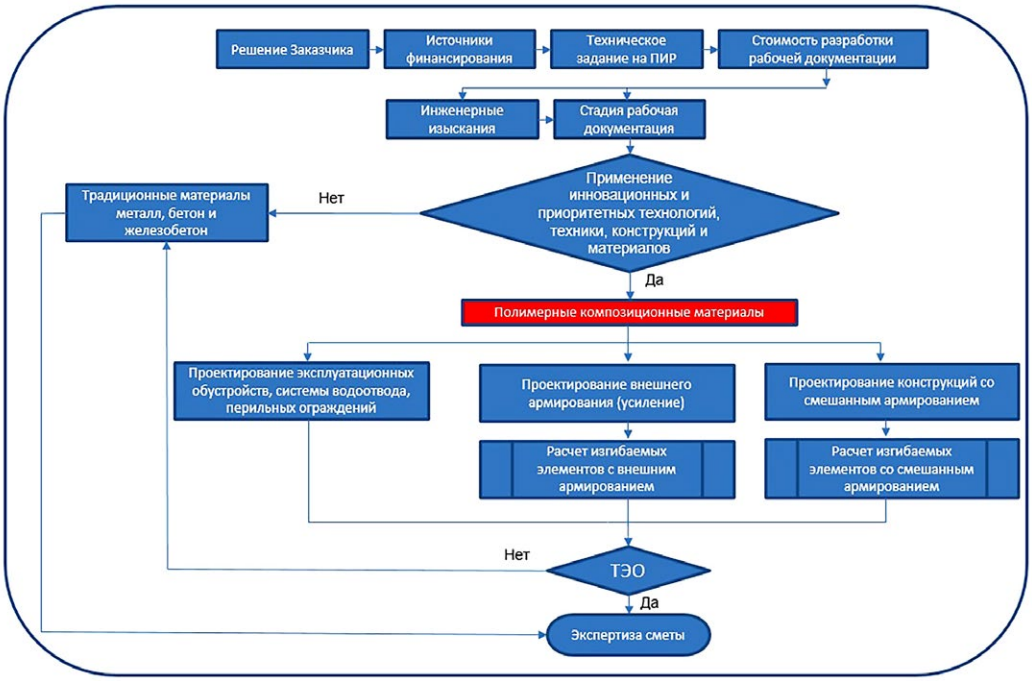


Рис. 3. Алгоритм модуля проектирования ремонта, капитального ремонта мостов

Fig. 3. Algorithm of the design module for repair and major repairs of bridges

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В соответствии с действующими нормативными документами несущие конструкции мостов рассчитывают на действие постоянных и временных нагрузок с использованием метода предельных состояний. Соответственно, принципы проектирования усиления железобетонных конструкций мостов полимерными композиционными материалами должны быть основаны на методе предельных состояний. На Рис. 4 показано расположение внутренних усилий и форма эпюры напряжений в сжатой зоне бетона в предельном состоянии для сечения, перпендикулярного к продольной оси усиленного балочного железобетонного элемента композиционным материалом прямоугольной формы поперечного сечения для определения предельного несущего момента M^y.

При расчете усиленных железобетонных конструкций следует ограничивать напряжения в полимерном композиционном материале предельной величиной, что предотвращает возможность разрушения бетонного основания, на которое нанесен композиционный материал, или его возможное отслоение по контакту «клей-бетон» [10, 11]. Значение

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

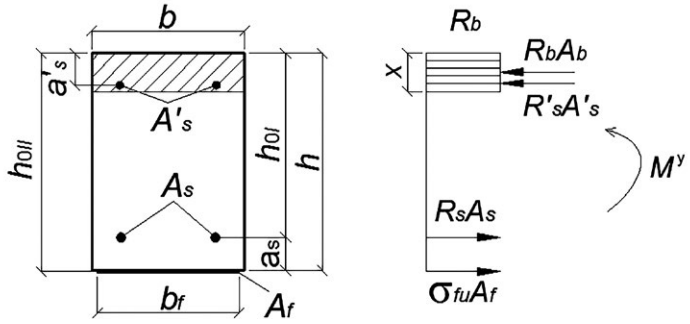


Рис. 4. Расположение внутренних усилий и форма эпюры напряжений в сжатой зоне бетона в предельном состоянии для прямоугольного сечения, перпендикулярного к продольной оси усиленного балочного железобетонного элемента композиционным материалом

Fig. 4. Location of internal forces and the shape of the stress diagram in the compressed zone of concrete in the limit state for a rectangular section perpendicular to the longitudinal axis of a reinforced concrete beam element composite material

предельных напряжений в материале усиления, расположенном на нижней грани балки, следует определять по следующей формуле:

$$\sigma_{fu} = k_s \sqrt{\frac{R_b E_{ft} b_f}{\sum t_f}} \le \gamma_c R_{ft}, \quad (1)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий тип конструкции усиления; b_f – единичная ширина полосы материала усиления; t_f – толщина одного слоя композиционного материала, мм; E_f – модуль упругости композиционного материала, МПа; h – высота главной балки, м; R_b – расчетная прочность бетона на сжатие, МПа; γ_c – обобщенный коэффициент, учитывающий снижение физико-механических характеристик полимерного композита в процессе эксплуатации конструктивных элементов; R_{ft} – расчетная прочность композиционного материала на растяжение, МПа.

Прочность усиленных сечений прямоугольного поперечного сечения, перпендикулярных к продольной оси балочных элементов, на действие изгибающих моментов определяют по формуле:

$$M^y = R_b x b \left(h_{0I} - 0,5x\right) + R_{sc} A'_s \left(h_{0I} - a'_s\right) + \sigma_{fu} A_f a_f, \quad (2)$$

высота сжатой зоны x определяется соотношением:

$$x = \frac{R_s A_s + \sigma_{fu} A_f - R_{sc} A'_s}{R_b b}, \quad (3)$$

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

где R_{sc}, R_s, R_b – предельные сопротивления арматуры сжатию и растяжению, бетона сжатию, соответственно, МПа; A'_s, A_s – площадь сечения сжатой и растянутой рабочей арматуры, м^2; A_f – площадь сечения волокон композиционного материала, м^2; b – приведенная ширина сечения балочного элемента, м; a_s, a'_s и a_f – расстояние до центра тяжести растянутой и сжатой арматуры, волокон композиционного материала, м; h_{0I} – размер эффективной высоты неусиленного сечения, м.

Расчет сечений, перпендикулярных к продольной оси усиленного балочного железобетонного элемента композиционным материалом тавровой формы, аналогичен, как для прямоугольных, но предельный момент определяют в зависимости от расположения границы сжатой зоны по высоте элемента. При известной доле временной нагрузки до усиления (M_k/M) может быть определена несущая способность сечения элемента, усиленного без разгрузки от собственного веса согласно:

$$M^{y\delta} = M + (M^y - M)\frac{M_k}{M}, \quad (4)$$

где $M=M_p+M_k$ – суммарная доля изгибающего момента от действия постоянных и временных нагрузок.

Если допустимая температура эксплуатации конструкции T_α, усиленной полимерными композиционными материалами, при которой определяется несущая способность больше, либо равна температуре, при которой осуществляется отверждение эпоксидной матрицы композиционного материала T_f, то предельные нормальные напряжения в композиционном материале необходимо определять по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_{fu} = \sigma_{fu} - \sigma_{ft} \le 0,9R_{ft}, \quad (5)$$

где σ_{ft} – нормальные напряжения в композиционном материале от действия температуры при $T_\alpha \ge T_f$, определяемые согласно, МПа:

$$\sigma_{ft} = \left(\alpha_f + \alpha_b\right)\left(T_\alpha - T_f\right) E_f, \quad (6)$$

где α_f, α_b – коэффициент температурного расширения композиционного материала и бетона, 10^{-6} °C^{-1}; T_α – допустимая температура эксплуатации конструкции, усиленной композиционными материалами, °C; T_f – температура, при которой осуществляется отверждение эпоксидной матрицы композиционного материала, °C.

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

Если расчетная температура эксплуатации конструкции T_α, усиленной композиционными материалами, меньше температуры, при которой осуществляется отверждение эпоксидной матрицы композиционного материала T_f, то предельные нормальные напряжения в композиционном материале необходимо определять по формуле:

$$\Delta\sigma_{fu} = \sigma_{fu} + \sigma_{ft} \le 0,9R_{ft}, \quad (7)$$

для которой при $T_\alpha < T_f$ рассчитывается согласно выражению:

$$\sigma_{ft} = \left(\alpha_b - \alpha_f\right) \left|T_\alpha - T_f\right| E_f. \quad (8)$$

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОСТОВ СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ И ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ АРМАТУРОЙ

При проектировании изгибаемых железобетонных элементов со смешанным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой следует учитывать ряд особенностей совместной работы бетона в нормальном сечении и композиционной арматуры, которые связанны с высокой прочностью волокон

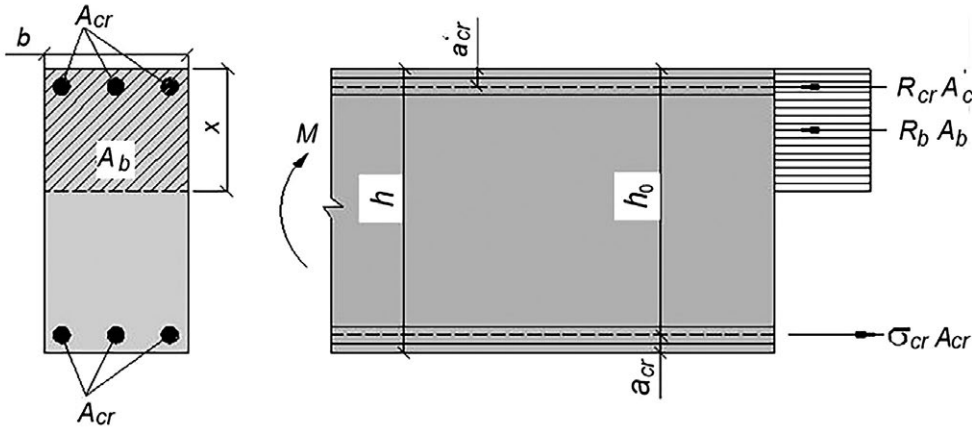


Рис. 5. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента со смешанным армированием, при расчете его по прочности

Fig. 5. Scheme of forces and stress diagram in the section normal to the longitudinal axis of a bending reinforced concrete element with mixed reinforcement, when calculating its strength

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

полимерных композиционных материалов и их анизотропными свойствами [12–14]. На Рис. 5 показана схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента со смешанным армированием, при расчете его по прочности.

Предельные нормальные напряжения в полимерной композиционной арматуре могут определяться по формуле:

$$\sigma_{cr} = \varepsilon_{cr} E_{cr}, \quad (9)$$

с учетом условия:

$$\sigma_{cr} \le R_{cr}, \quad (10)$$

где ε_{cr} – предельные относительные деформации растяжения в полимерной композиционной арматуре в момент наступления предельного состояния в сечении, нормальном к продольной оси элемента; E_{cr} – модуль упругости полимерной композиционной арматуры, МПа, R_{cr} – расчетное сопротивление полимерной композиционной арматуры растяжению, соответственно, МПа.

При этом величину предельных нормальных напряжений σ_{cr} в полимерной композиционной арматуре в данном представлении возможно определить только с использованием расчета сечений, нормальных к продольной оси элемента, по диаграммам деформирования бетона и арматуры. В случае применения метода предельных состояний без использования нелинейной деформационной модели расчет прямоугольных сечений при $\xi = \frac{x}{h_0} \le \xi_y$ следует производить из следующего условия:

$$M \le R_b x b \left(h_0 - 0,5x\right) + R'_{cr} A'_{cr} \left(h_{01} - a'_{cr}\right), \quad (11)$$

где M – изгибающий момент от внешних сил, кН; R'_{cr} – расчетное сопротивление полимерной композиционной арматуры, МПа; ξ – относительная высота сжатой зоны; ξ_y – предельная относительная высота сжатой зоны, определяемая по пункту 7.61 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»; h_0 – рабочая высота сечения, м, определяемая по формуле (12):

$$h_0 = h - a_{cr}, \quad (12)$$

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

где h – высота поперечного сечения элемента, м; a'_{cr}, a_{cr} – расстояния от верхней грани элемента до центра тяжести сжатой полимерной композиционной арматуры, от нижней грани элемента до центра тяжести растянутой полимерной композиционной арматуры соответственно, м (Рис. 4).

При этом высоту сжатой зоны x следует определять из уравнения равновесия по формуле:

$$\sigma_{cr} A_{\text{cr}} - R'_{cr} A'_{cr} = R_b b x , \quad (13)$$

где A_{cr}, A'_{cr} – площадь поперечного сечения растянутой и сжатой полимерной композиционной арматуры, м^2; b – ширина поперечного сечения элемента (ребра), м.

В связи с тем, что прочность полимерной композиционной арматуры во много раз выше, чем металлической, и при этом сортамент композиционной арматуры по диаметру аналогичен металлической, то в случае смешанного армирования изгибаемых железобетонных элементов расчетное сопротивление композиционной арматуры R_{cr} в первом приближении можно считать условно бесконечной величиной, а в принятых расчетных моделях метода предельных состояний определять в ней нормальные напряжения σ_{cr}, когда $x = h_0\xi_y$. То есть условно считать, что предельное состояние бетона сжатой зоны изгибаемых элементов наступает ранее достижения в растянутой полимерной композиционной арматуре напряжения, равного их расчетному сопротивлению R_{cr}. Исходя из вышесказанного величина предельных нормальных напряжений в полимерной композиционной арматуре σ_{cr} в момент наступления предельного состояния в бетоне сжатой зоны изгибаемых элементов прямоугольного поперечного сечения может быть найдена из уравнения равновесия в виде:

$$\sigma_{cr} A_{cr} - R'_{cr} A'_{cr} = R_b b h_0 \xi_y , \quad (14)$$

из которого

$$\sigma_{cr} = \frac{R_b b h_0 \xi_y + R'_{cr} A'_{cr}}{A_{cr}} . \quad (15)$$

Расчет изгибаемых элементов таврового поперечного сечения по изгибающему моменту производится по аналогичным формулам в зависимости от положения границы сжатой зоны x.

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕЛЬНОКОМПОЗИТНЫХ ГЛАВНЫХ БАЛОК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ИЗ ПУЛТРУЗИОННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА

Применение пултрузионного стеклопластика при изготовлении пролетных строений пешеходных мостов широко известно. В большинстве случаев это ферменные конструкции, элементы которых выполнены из определенного стеклопластикового сортамента, объединение которых осуществляется через металлические накладки, каркасы и фасонки с помощью металлических болтовых соединений [15]. На сегодняшний день в России отсутствуют рекомендации по проектированию цельнокомпозитных пролетных строений автодорожных мостов. Ниже представлены принципы проектирования цельнокомпозитных главных балок автодорожных мостов.

Главные балки пролетных строений автодорожных мостов из полимерных композиционных материалов следует проектировать коробчатого поперечного сечения с поперечными перегородками между вертикальными стенками по высоте (не менее двух) с толщиной стенок t не менее 15 мм, изготовленные методом пултрузии. Оптимальное соотношении высоты h главной балки к ее ширине b – 2,6:1. Форма поперечного сечения представлена на Рис. 6. Материалы для изготовления главных балок пролетных строений автодорожных мостов из полимерных композитов должны соответствовать требованиям ГОСТ 33344-2015. Значения расчетных характеристик полимерных композитов следует

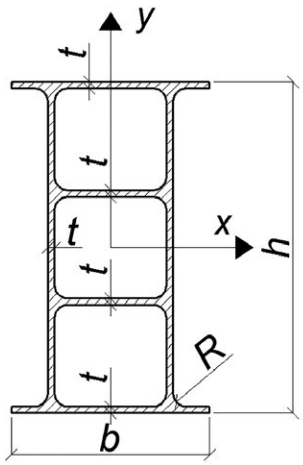


Рис. 6. Форма поперечного сечения главной балки композитного пролетного строения

Fig. 6. Cross-sectional shape of the main beam of a composite superstructure

Received: 22.08.2024
Поступил: 22.08.2024
Revised: 12.09.2024
Одобрена: 12.09.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

принимать по пунктам 12.5, 12.6, 12.7 и 12.8 СП 35.13330.2011. Расчет главных балок автодорожных мостов из полимерных композитов следует проводить в предположении их линейно-упругой работы с использованием компьютерных программ по методу конечных элементов (с использованием пространственных конечно-элементных моделей), позволяющему учитывать анизотропность свойств полимерного композита.

Строительный подъем, компенсирующий вертикальные деформации пролетного строения от постоянной нагрузки, коэффициент надежности по нагрузке, вертикальные упругие прогибы пролетных строений, расчетные периоды собственных колебаний в пролетных строениях автодорожных мостов принимаются по соответствующим разделам СП 35.13330.2011.

Расчеты по предельным состояниям главных балок автодорожных мостов из полимерных композитов должны проводиться с учетом положений ГОСТ 27751. Расчет конструкций из полимерных композитов по изгибающему моменту следует производить в соответствии с СП 35.13330.2011 с использованием следующего неравенства:

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \le R_{b_0n}, \tag{16}$$

где M_x, M_y – величина изгибающего момента от действия расчетных постоянных и временных нагрузок, кНм; W_x, W_y – момент инерции и момент сопротивления сечения относительно осей x и y, м^3 (Рис. 5); R_{b_0n} – расчетное сопротивление при изгибе вдоль пултрузии, определяемое по п. 12.5 СП 35.13330.2011, МПа.

Расчет конструкций из полимерных композитов по поперечной силе следует производить в соответствии с СП 35.13330.2011 с использованием следующего неравенства:

$$\frac{Q_y S_x}{\sum t I_x} \le R_{LT_0n}, \tag{17}$$

где Q_y – величина поперечной силы в опорном сечении главной балки от действия расчетных постоянных и временных нагрузок, кН; S_x – статический момент площади отсеченной части относительно оси x, м^2; $\sum t$ – суммарная толщина вертикальных стенок главной балки коробчатого сечения на уровне исследуемой точки, м; I_x – момент инерции сечения относительно оси x, м^4; R_{LT_0n} – предел прочности при сдвиге в плоскости вдоль пултрузии, определяемое по п. 12.5 СП 35.13330.2011, МПа.

Received: 22.08.2024 Revised: 12.09.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 22.08.2024 Одобрена: 12.09.2024 Принята: 30.09.2024

Проверка прочности главных балок пролетных строений автодорожных мостов по способности воспринимать напряжения при сжатии и растяжении поперек пултрузии производится по результатам анализа напряженно-деформированного состояния их пространственных конечно-элементных моделей путем сравнения полученных фактических напряжений, от действия расчетных постоянных и временных нагрузок, с величинами соответствующих расчетных сопротивлений. При этом конечно-элементные модели композитных пролетных строений автодорожных мостов должны быть выполнены из пластинчатых или объемных конечных элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны теоретические основы оценки несущей способности пролетных строений мостов с элементами из полимерных композиционных материалов, которые должны применяться при проектировании таких конструкций. Принципы проектирования пролетных строений мостов с элементами из полимерных композиционных материалов учитывают различные климатические условия эксплуатации мостов, особенности их работы под воздействием постоянных и временных нагрузок, а также анизотропные свойства полимерных композиционных материалов. Для возможности более широкого практического использования полимерных композиционных материалов в мостовых сооружениях необходимо включить результаты настоящих исследований в национальные стандарты и своды правил.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.
The author declare that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смердов Д.Н., Ящук М.О. Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. Т. 55, № 3. С. 72–83. doi: 10.25987/VSTU.2019.55.3.008
2. Селиванова Е.О., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования ползучести в композиционных материалах, усиливающих изгибаемые железобетонные элементы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. Т. 33, № 2. С. 95–99. EDN: ZAEKKP

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

3. Неволин Д.Г., Смердов М.Н., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 138–142. EDN: VAYFKJ
4. Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. Т. 43, № 3. С. 50–55. EDN: TFCSEB
5. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // Интернет-Журнал Науковедение. 2013. Т. 16, № 3. С. 168. EDN: QZYAAT
6. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 2 (614). С. 112–124.
7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Исследование влияния многократного замораживания и оттаивания на изменение несущей способности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Транспорт Урала. 2010. Т. 26, № 3. С. 98–104. EDN: MVLIBL
8. Бокарев С.А., Устинов В.П., Яшнов А.Н., Смердов Д.Н. Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 30–31.
9. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Полимерные композиционные материалы в транспортном строительстве // Транспорт Урала. 2016. Т. 48, № 1. С. 24–30. EDN: VRDJSL doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-24-30
10. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. Т. 622, № 10. С. 63–74.
11. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. Т. 27, № 2. С. 113–125. EDN: MNGZUN
12. Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Интернет-Журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 1. С. 34. EDN: YMXOVP
13. Неволин Д.Г., Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами // Транспорт Урала. 2015. Т. 46, № 3. С. 98–101. EDN: UKFQTT

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

14. Плевков В.С., Балдин И.В., Невский А.В. К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. Т, 60, № 1. С. 96–113. Дата обращения: 23.08.2024. Режим доступа: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/273/274
15. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., и др. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 25–37. Дата обращения: 23.08.2024. Режим доступа: http://www.issp.ac.ru/journal/composites/2009/2009_3/ushakov.pdf

REFERENCES

1. Smerdov DN, Yashchuk MO. Experimental studies of the load-carrying capacity of flexible reinforced concrete elements strengthened by prestressed polymer composites. *Russian Journal of Building Construction and Architecture.* 2019;3(55):72–83. (In Russ.) doi: 10.25987/VSTU.2019.55.3.008
2. Selivanova EO, Smerdov DN. Experimental study of creep in composite materials, bending reinforcement concrete elements. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN.* 2017;2(33):95–99. (In Russ.) EDN: ZAEKKP
3. Nevolin DG, Smerdov MN, Smerdov DN. Experimental investigations of supporting capacity of reinforced-concrete constructions at mining-technical buildings and constructions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* 2015;8:138–142. (In Russ.) EDN: VAYFKJ
4. Klement'ev AO, Smerdov DN, Smerdov MN. Experimental studies of reliability and deformability of bending concrete elements reinforced in compression and tension areas by non-metallic composites. *Transport Urala.* 2014;4(43):50–55. (In Russ.) EDN: TFCSEB
5. Bokarev SA, Kostenko AN, Smerdov DN, Nerovnykh AA. Experimental studies of reinforced with polymer composites ferroconcrete specimens at low and high temperatures. *Internet-zhurnal 'Naukovedenie'.* 2013;3(16):168. (In Russ.) EDN: QZYAAT
6. Bokarev SA, Smerdov DN. Experimental studies of bent reinforced concrete elements reinforced with composite materials. *Automation in Construction.* 2010;2(614):112–124. (In Russ.)
7. Bokarev SA, Smerdov DN. Research of multiple freezing and thawing influence on change of bearing and deformative abilities of the reinforced concrete flexural elements strengthened by the composite materials. *Transport Urala.* 2010;3(26):98–104. (In Russ.) EDN: MVLIBL
8. Bokarev SA, Ustinov VP, Yashnov AN, Smerdov DN. Usilenie proletnykh stroenii s ispol'zovaniem kompozitnykh materialov. *Put' i putevoe khozyaistvo.* 2008;6:30–31. (In Russ.)
9. Bokarev SA, Smerdov DN. Polymer composite materials in transport construction industry. *Transport Urala.* 2016;1(48):24–30. (In Russ.) EDN: VRDJSL doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-24-30

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

10. Bokarev SA, Smerdov DN, Nerovnykh AA. Metodika rascheta po prochnosti sechenii ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh proletnykh stroenii, usilennykh kompozitnymi materialami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo.* 2010;10(622):63–74. (In Russ.)
11. Bokarev SA, Smerdov DN. The nonlinear analysis of bending reinforced concrete structures strengthened by composite materials. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2010;2(27):113–125. (In Russ.) EDN: MNGZUN
12. Smerdov DN, Klementyev AO. The calculation of the strength of the cross-sections normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement in metal and polymer composite fittings, using a nonlinear deformation model of the material. *Internet-zhurnal Naukovedenie.* 2017;1(9):34. (In Russ.) EDN: YMXOVP
13. Nevolin DG, Klementyev AO, Smerdov DN, Smerdov MN. A method to analyze performance of bendingconcrete elements reinforced with polymer composites. *Transport Urala.* 2015;3(46):98–101. (In Russ.) EDN: UKFQTT
14. Plevkov VS, Baldin IV, Nevskii AV. Estimated Stresses in Steel and Carbon Reinforced Composite Rebar of Normal Sections in Concrete Structures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2017;(1):96–113. (In Russ.) Accessed: 23.08.2024 Available from: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/273/274
15. Ushakov AE, Klenin UG, Sorina TG, et al. Bridge structures made of composites. *Composites and Nanostructures.* 2009;(3):25–37. (In Russ.)]. Accessed: 23.08.2024 Available from: http://www.issp.ac.ru/journal/composites/2009/2009_3/ushakov.pdf

Сведения об авторах:
СМЕРДОВ Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 7141-4210; ORCID: 0000-0003-2022-4565;
E-mail: DNSmerdov@mail.ru

Information about the authors:
Dmitriy N. SMERDOV, Candidate of Sciences in Engineering,
Senior Research Associate;
eLibrary SPIN: 7141-4210; ORCID: 0000-0003-2022-4565;
E-mail: DNSmerdov@mail.ru

Received: 22.08.2024 **Revised: 12.09.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 22.08.2024 **Одобрена: 12.09.2024** **Принята: 30.09.2024**

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

https://doi.org/10.17816/transsyst634716

© М.Е. Васильева[1], Е.М. Волкова[2], А.В. Гурьянов[2]
[1] СПб ГУП «Горэлектротранс»
[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ

Цель. Уточнение подхода к оценке экономической эффективности проектов строительства пассажирского транспортно-пересадочного узла, обеспечивающего его финансово-экономическую безопасность и эффективное функционирование, учитывающего экстерналии реализуемых проектов.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования используются методы обобщения, сравнительного анализа, систематизации данных научных публикаций, а также методы оценки экономической эффективности инвестиционных проектов в совокупности с методами оценки общественных эффектов, обусловленных реализацией проектов строительства транспортно-пересадочного узла (далее – ТПУ). Информационной базой исследования являются научные публикации, посвященные разработке методов экономического описания работы ТПУ, а также проект ТПУ Волковская, разработанный ООО «Архиди» по заказу Комитета по транспорту г. Санкт-Петербурга.

Результаты. Основным научным результатом является подход к экономической оценке эффективности ТПУ, включающий оценку его общественной эффективности путем учета в денежных потоках проекта притоков от сокращения времени в пути и сокращения нагрузки на улично-дорожную сеть города. Апробация предложенного подхода проводится на примере проекта строительства пассажирского ТПУ «Волковская».

Заключение. Сформированы рекомендации по оценке экономической эффективности проектов строительства ТПУ, учитывающие их коммерческую и общественную эффективность. Результаты могут быть использованы исполнительными органами государственной власти, в чьи задачи входит развитие городской транспортной инфраструктуры, а также частными инвесторами, планирующими участие в проектах строительства пассажирских ТПУ.

Ключевые слова: пассажирский ТПУ; автомобилизация; улично-дорожная сеть; инвестиционный проект; финансово-экономическая безопасность; экстерналия; экономический эффект.

Как цитировать:
Васильева М.Е., Волкова Е.М., Гурьянов А.В. Обеспечение финансово-экономической безопасности проектов строительства транспортно-пересадочных узлов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 435–445. doi: 10.17816/transsyst634716

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Rubric 3. TRANSPORT ECONOMICS

© M.E. Vasilyeva[1], E.M. Volkova[2], A.V. Guryanov[2]
[1] St. Petersburg State Unitary Enterprise "Gorelektrotrans"
[2] Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

PROVIDING FINANCIAL AND ECONOMIC SECURITY OF PROJECTS FOR THE CONSTRUCTION OF TRANSPORT HUBS

Aim. The goal is to develop an approach for evaluating the economic efficiency of constructing passenger transport hubs, providing financial and economic security of investment projects and promoting the effective operation of these hubs, while considering the external impacts of ongoing projects.

Materials and Methods. The study involved collecting and analyzing data from scientific articles, papers, and open online sources. Economic assessment and investment analysis were used to evaluate the efficiency of passenger transport hub construction projects. The research also drew on scientific publications discussing economic descriptions of transport hubs, using the Volkovskaya TPU project, developed by Archidi LLC by order of the St. Petersburg Transport Committee.

Results. The main scientific result is an approach for economically assessing transport hub projects. This approach includes assessing the public effectiveness by factoring in benefits such as reduced travel time and decreased load on the city's road network within the project's cash flows. The proposed approach was tested using the Volkovskaya transport hub construction project.

Conclusion. Finally, the authors developed recommendations for socio-economic assessment of passenger transport hub construction projects, considering both the commercial and social effectiveness of their operation. The results of the research are valuable for regional authorities involved in urban transport infrastructure development and companies financing the construction of passenger transport hubs.

Keywords: passenger transport hub; motorization; transport network; investment project; financial and economic security; externality; economic effect.

To cite this article:
Vasilyeva ME, Volkova EM, Guryanov AV. Providing financial and economic security of projects for the construction of transport hubs. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2024;10(3):435–445. doi: 10.17816/transsyst634716

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

ВВЕДЕНИЕ

Понятие финансово-экономической безопасности в литературе рассматривается зачастую применительно к экономическим системам макроуровня: мировой, национальной, региональной. Так, в статье Ю.Н. Воробьева, Д.Н. Порицкого дается следующее определение данного понятия: «характеристика финансово-экономической системы конкретной территории или организации, свидетельствующая о потенциальных возможностях этой системы стабильно и устойчиво функционировать в постоянно меняющихся условиях внешней и внутренней среды, разнообразных угроз и рисков, сохранении перспектив для экономического развития» [1]. Исходя из смысла приведенного авторского определения можно заключить, что финансово-экономическая безопасность может использоваться не только на макроуровне, но и на уровне проектов, в том числе определяющих направления развития транспортной системы [2].

Данный вывод находит подтверждение в статье Смелика Р.Г. и Смелика Г.Р. [3]. Авторы констатируют тот факт, что в настоящий период экономическая безопасность инвестиционных проектов не имеет однозначной трактовки и определяется в основном путем идентификации и оценки рисков. Вместе с тем имеет смысл определить ее по принципу «от общего к частному», основываясь на декомпозиции определения экономической безопасности на национальном уровне. В статье имеется авторское определение категории экономической безопасности на уровне инвестиционного проекта; отмечается, что главной целью обеспечения экономической безопасности на этом уровне является создание условий для эффективной реализации проекта. Кроме того, авторы статьи выделяют отдельные компоненты экономической безопасности проекта, содержание которых будет зависеть от вида проекта, его направленности и отраслевой специфики. Среди этих компонент можно выделить финансовую, кадровую, технологическую, правовую, экологическую, силовую и информационную безопасность проекта.

Особое место в инфраструктурных проектах, по нашему мнению, должно отводиться обеспечению их финансовой безопасности. Это означает, что проект должен быть максимально защищен от финансовых угроз во внешней среде, а также предсказуем и устойчив в аспекте динамики финансовых показателей. Обеспечение финансовой безопасности инвестиционного проекта является одним из основополагающих условий его реализации. Вместе с тем, она тесно связана с другими компонентами

Received: 27.05.2024 Revised: 03.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 27.05.2024 Одобрена: 03.07.2024 Принята: 30.09.2024

экономической безопасности, в частности, с технико-технологической безопасностью. Далее мы попытаемся раскрыть содержание финансово-экономической безопасности на примере проектов строительства пассажирских транспортно-пересадочных узлов (далее – ТПУ).

Развитая сеть пассажирских ТПУ на данный момент имеется только в Москве. Общее число ТПУ превышает 250 единиц, при этом за последние семь лет реализованы проекты строительства 63 ТПУ, причем только за 2023 год было построено 37 ТПУ. При этом, в остальных крупных городах России строительство ТПУ идет гораздо более медленными темпами. Так, в Санкт-Петербурге сформирован перечень приоритетных ТПУ на базе действующих и проектируемых станций метрополитена. Однако, общее планируемое число ТПУ составляет 61 единицу (при этом 9 ТПУ планируется построить до конца 2025 года). Для сравнения, на сегодняшний день в Санкт-Петербурге всего 11 транспортных узлов, объединяющих метро с железнодорожным транспортом, и 5 вокзалов [4]. По итогам приведенных выше статистических данных можно говорить неравномерности развития ТПУ в российских городах и наличии масштабных планов по их строительству.

Следует отметить актуальность реализации проектов строительства ТПУ в российских городах. Пассажирские ТПУ положительно влияют на общее время поездки, сокращая время ожидания транспорта и пересадки, что отмечено в работе [5]. Вместе с тем по мере эволюции ТПУ происходит значительное расширение числа выполняемых ими функций. О.Д. Покровская (см. [6]) отмечает превращение ТПУ в центры сервисного обслуживания и притяжения инвестиций. Шульженко Т.Г. также подчеркивает необходимость обеспечения клиентоцентричности всех элементов пассажирских транспортных систем [7]. Singh B. относит к характеристикам интеллектуальных транспортных систем их сложную структуру. Как следствие, большинство современных проектов ТПУ реализуется с применением форм государственно-частного партнерства и предполагает сочетание основной и дополнительных (сервисных, торговых, деловых, культурно-бытовых) функций. В связи с этим приобретает актуальность решение двух задач. Первая – это научное обоснование подхода к экономической оценке общественной эффективности в проектах строительства ТПУ. Вторая – проработка конструктивных и планировочных решений на проектной стадии его жизненного цикла, обеспечивающих эффективную работу ТПУ на стадии эксплуатации при сочетании коммерческой и основной функции.

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

Смирнов С.А. обосновывает необходимость комплексной оценки экономической эффективности транспортных инфраструктурных проектов, включая оценку общественной эффективности [8]. В связи с чем в данной работе мы ставим цель уточнить имеющиеся методы оценки общественных эффектов, возникающих в проектах строительства пассажирских ТПУ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы достичь поставленной цели, в настоящей статье мы использовали результаты научных исследований по проблематике эффективности транспортно-пересадочных узлов, а также основывались на общих принципах и правилах проведения инвестиционного анализа. Для разработки уточненных методов оценки общественной эффективности проектов строительства пассажирских ТПУ мы использовали методологический подход к определению качества транспортного обслуживания. Для апробации уточненной методики оценки экономической эффективности инвестиций в строительство пассажирского ТПУ был использован проект ТПУ «Волковская».

РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 1 представлены результаты систематизации положительных экстерналий (социальных эффектов), генерируемых проектами строительства пассажирских транспортно-пересадочных узлов в агломерациях.

Рис. 1. Систематизация положительных экстерналий, возникающих в проектах строительства пассажирских ТПУ

Fig. 1. Externalities generated by projects of passenger transport hubs construction

Received: 27.05.2024 Revised: 03.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 27.05.2024 Одобрена: 03.07.2024 Принята: 30.09.2024

Поскольку проекты строительства и модернизации пассажирских ТПУ реализуются на основе различных форм государственно-частного партнерства, для обоснования структуры инвестиций целесообразно проводить стоимостную оценку как коммерческих, так и общественных эффектов (экстерналий). По этой причине целесообразно выделить основные экстерналии, генерируемые подобными проектами и поддающиеся стоимостной оценке: сокращение времени пересадок и разгрузка улично-дорожной сети (УДС) агломерации.

Стоимостная оценка экономии времени за счет развития пассажирских ТПУ может быть основана на стоимости единицы времени пассажира, вычисленной либо через средний заработок, либо через валовую добавленную стоимость на территории агломерации. Второй подход кажется нам более подходящим, поскольку мы стремимся дать оценку времени с точки зрения того продукта, который может быть создан в экономике за счет сокращения потерь времени в пути.

Стоимостная оценка разгрузки УДС агломерации может быть проведена с использованием ожидаемых данных о снижении числа автомобилей на прилегающих к ТПУ участках, оценке средней дальности поездки пассажира и стоимостной оценке 1 км автопробега.

Методы оценки экстерналий в проектах строительства пассажирских ТПУ в компактном виде представлены в Табл. 1.

Предложенная нами методика применялась для экономической оценки ТПУ Волковская (проект ООО «Архиди» по заказу Комитета по транспорту г. Санкт-Петербурга). Данный ТПУ проектировался на базе одноименной станции Петербургского метрополитена с перспективным строительством пассажирской железнодорожной станции и бизнес-центра. Перспективный пассажиропоток на территории ТПУ по данным разработчика будет зависеть как от числа его элементов, так и от востребованности. Пределы его колебаний, согласно данным проекта, составят от 41 до 55 тыс. пассажиров в сутки. Учитывая эти пределы, а также официальные статистические данные о ВРП, числе занятых, данные о стоимости километра пробега легкового автомобиля (сайт «Авторейтинг.ру»), мы оценили верхний и нижний пределы значений показателей (эффектов) согласно Табл. 1. Результаты наших расчетов показаны в Табл. 2.

С учетом показателей, представленных в Табл. 2, далее проводилась экономическая оценка общественной эффективности проекта по двум вариантам его реализации (с использованием верхних и нижних пределов

Received: 27.05.2024 Revised: 03.07.2024 Accepted: 30.09.2024
Поступил: 27.05.2024 Одобрена: 03.07.2024 Принята: 30.09.2024

Таблица 1. *Методы оценки экстерналий в проектах строительства пассажирских ТПУ*

Table 1. *Methods of externalities assessment in projects of passenger transport hubs construction*

Показатель	Модель расчета и условные обозначения
Стоимостная оценка роста скорости перевозок за счет сокращения времени пересадок	$РД \cdot А \cdot ВДСп \cdot \Delta t$ где РД – число рабочих дней в году; А – число пассажиров, ежедневно использующих ТПУ, пасс./сут.; ВДСп – валовая добавленная стоимость, приходящаяся на 1 чел.-ч; Δt – ежедневная экономия времени пассажира, использующего ТПУ, ч
Валовая добавленная стоимость, приходящаяся на 1 чел.-ч	$ВДСп = \frac{ВДС}{365 * 24 * TP}$ где ВДС – показатель валовой добавленной стоимости в агломерации, руб.; TP – занятые в экономике агломерации, чел.
Стоимостная оценка повышения привлекательности общественного транспорта и разгрузки УДС агломерации	$365 * \Delta N * С_{км} * l_{ср}^{м}$ где ΔN – среднесуточное уменьшение размеров автомобильного движения на прилегающих участках УДС, ед./сут. $С_{км}$ – стоимостная оценка 1 автомобиле-км, руб.; $l_{ср}^{м}$ – усредненная длина автомобильного маршрута в городском сообщении, км.

Таблица 2. *Результаты расчета общественных эффектов ТПУ «Волковская»*

Table 2. *Results of externalities assessment in project of Volkovskaya passenger transport hub*

Показатель	Результат расчета
Стоимостная оценка роста скорости перевозок за счет сокращения времени пересадок	Нижний предел: 339 млн. руб./ год Верхний предел: 825 млн. руб./год
Стоимостная оценка повышения привлекательности общественного транспорта и разгрузки УДС агломерации	179 млн. руб./год
Общая стоимостная оценка экстерналий проекта	Нижний предел: 518 млн. руб./год Верхний предел: 1003,2 млн. руб./год

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

общественного эффекта соответственно). Динамика финансовых показателей проекта при расчете по нижнему пределу общественного эффекта представлена на Рис. 2.

Как видно из Рис. 2, по первому варианту проект за 20 лет не окупается. При этом показатель приведенного экономического эффекта остается отрицательным. Индекс доходности принимает значение 0,6, что говорит о неэффективности данного проекта, обусловленного низкой востребованностью ТПУ «Волковская» у пассажиров.

Второй вариант реализации проекта предполагает моделирование денежных потоков с использованием верхнего предела общественных эффектов, представленных в Табл. 2. Динамика финансовых показателей проекта при расчете по верхнему пределу общественного эффекта представлена на Рис. 3.

Из Рис. 3 видно, что по второму варианту проект имеет положительные показатели расчетного и приведенного экономического эффекта. В данном случае инвестиции в строительство ТПУ окупаются через 11 лет за счет общественных эффектов проекта. Индекс доходности при этом равен 1,35, что указывает на эффективность рассматриваемого проекта.

Рис. 2. Динамика финансовых показателей проекта
при расчете по нижнему пределу общественного эффекта
(РЭЭ – расчетный экономический эффект,
ПЭЭ – приведенный экономический эффект)

Fig. 2. Dynamics of the financial indicators of the project when calculating
at the lower limit of the social effect
(РЭЭ – calculated economic effect, ПЭЭ – reduced economic effect)

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

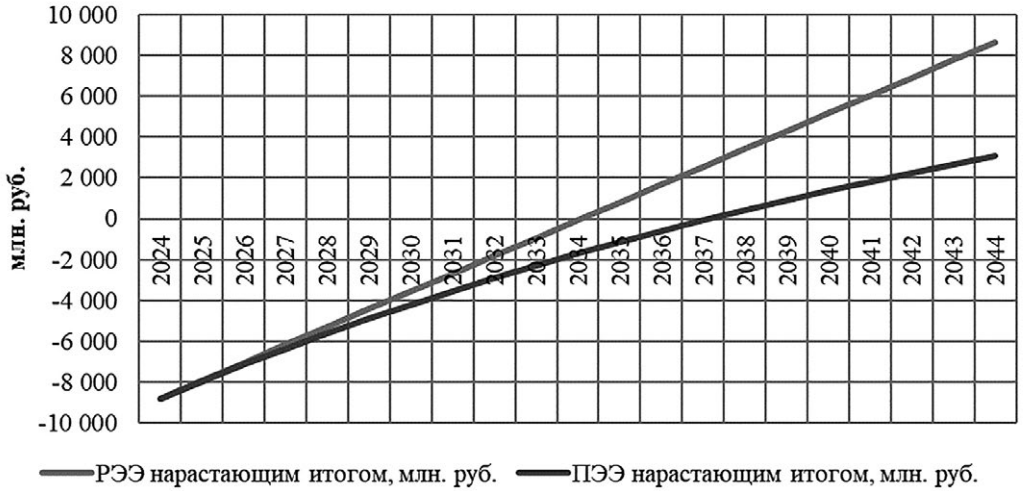


Рис. 3. Динамика финансовых показателей проекта при расчете по верхнему пределу общественного эффекта (РЭЭ – расчетный экономический эффект, ПЭЭ – приведенный экономический эффект)

Fig. 3. Results of financial indexes assessment in optimistic variant (РЭЭ – calculated economic effect, ПЭЭ – reduced economic effect)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Апробация предложенных методов оценки общественных эффектов на примере ТПУ «Волковская» позволяет сделать несколько выводов, важных для обеспечения успешной реализации проектов строительства пассажирских ТПУ.

1. Проекты строительства пассажирских ТПУ обеспечивают коммерческих и общественных эффектов, что делает целесообразной их реализацию с применением форм ГЧП. При этом в целях обеспечения финансово-экономической безопасности доли государства и частного инвестора должны соотноситься пропорционально величине совокупного общественного и коммерческого эффекта соответственно.
2. ТПУ способствует повышению привлекательности общественного транспорта и скорости перевозок пассажиров за счет сокращения времени ожидания и пересадки, а также разгрузке УДС агломерации.
3. Финансово-экономическая безопасность проекта ТПУ зависит от его востребованности у пассажиров, что обусловливает целесообразность дальнейших научных исследований с целью обоснования выбора мест размещения ТПУ в агломерации.

Received: 27.05.2024
Поступил: 27.05.2024
Revised: 03.07.2024
Одобрена: 03.07.2024
Accepted: 30.09.2024
Принята: 30.09.2024

4. Для повышения качества транспортных услуг необходимо обеспечить рациональные планировочные и конструктивные решения в проектах строительства ТПУ.

Использование данных выводов на практике будет способствовать повышению эффективности работы ТПУ, а также окупаемости государственных и частных инвестиций в их строительство.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев Ю.Н., Порицкий Д.В. Финансово-экономическая безопасность: теоретический аспект // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2015. Т. 31, № 2. С. 34–43. EDN: VNZDIJ
2. Журавлева Н.А., Никитин А.Б. Экономическая безопасность интеллектуальных транспортных систем. СПб: ИНСЭИ – оценка, 2022. EDN: HRTVWI
3. Смелик Р.Г., Смелик Г.Р. Экономическая безопасность инвестиционных проектов // Сервис в России и за рубежом. 2023. Т. 106, № 4. С. 6–19. doi: 10.5281/zenodo.10336038
4. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы [internet] Дата обращения: 15.04.24. Режим доступа: https://stroi.mos.ru
5. Гулый И.М. Методология оценки экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии на транспорте // Транспортные системы и технологии. 2019. Т. 5. № 4. С. 124–133. doi: 10.17816/transsyst201954124-133
6. Agafonova N., Pokrovskaya O.D., Merkulina I.A. Digital transformation of logistics and SCM. In: The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences. European Publisher, 2019. Vol. 82. P. 522–529. doi: 10.15405/epsbs.2020.04.67
7. Шульженко Т.Г., Жук А.Е., Иванова Д.П. Логистика новой городской мобильности: ценностно ориентированный подход. М.: ИНФРА-М, 2023.
8. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю., Соколова Я.В. Методика оценки эффектов от реализации проектов строительства новых линий пассажирского магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 161–173. doi: 10.17816/transsyst202061161-173

REFERENCES

1. Vorobev YN, Porickij DV. Finansovo-ekonomicheskaya bezopasnost: teoreticheskij aspekt. *Nauchnyj vestnik: finansy, banki, investicii.* 2015:2(31):34–43 (In Russ.) EDN: VNZDIJ

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**

2. Zhuravleva NA, Nikitin AB. Ekonomicheskaya bezopasnost intellektualnyh transportnyh sistem. St. Petersburg: INSEI – ocenka; 2022. (In Russ.) EDN: HRTVWI
3. Smelik RG, Smelik GR. Ekonomicheskaya bezopasnost' investicionnyh proektov. *Servis v Rossii i za rubezhom.* 2023:4(106):6–19 (In Russ.) doi: 10.5281/zenodo.10336038
4. Kompleks gradostroitel'noj politiki i stroitel'stva goroda Moskvy [Internet] (In Russ.) Accessed: 15.04.24. Available from: https://stroi.mos.ru
5. Guliy IM. Methodology for assessing the economic effects of investing in digital technologies in transportation. *Transportation Systems and Technology.* 2019;4(4):124–133. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst201954124-133
6. Agafonova N, Pokrovskaya OD, Merkulina IA. Digital transformation of logistics and SCM. In: *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences.* European Publisher; 2019;82:522–529. doi: 10.15405/epsbs.2020.04.67
7. Shulzhenko TG, Zhuk AE, Ivanova DP. *Logistika novoj gorodskoj mobil'nosti: cennostno orientirovannyj podhod.* Moscow: INFRA-M; 2014. (In Russ.)
8. Smirnov SA, Smirnova OY, Sokolova IV. Approach of evaluation the effects from implementation the projects of construction new passenger maglev lines. *Transportation Systems and Technology.* 2020;6(1):161–173. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst202061161-173

Сведения об авторах:
Волкова Елена Михайловна, кандидат экономических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;
E-mail: moonlight34@ya.ru
Васильева Мария Евгеньевна, специалист;
ORCID: 0009-0009-8125-4865;
E-mail: m.petrova@spbget.ru
Гурьянов Андрей Владимирович, доктор экономических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7354-5502; ORCID: 0000-0003-0858-6619;
E-mail: siluckova@yandex.ru

Information about the authors:
Elena Volkova, Candidate of Economic Sciences, associate professor;
eLibrary SPIN: 6886-5796; ORCID: 0000-0003-0620-463X;
E-mail: moonlight34@ya.ru
Maria Vasilyeva, specialist;
ORCID: 0009-0009-8125-4865;
E-mail: m.petrova@spbget.ru
Andrey Guryanov, Doctor of Economic Sciences, associate professor;
eLibrary SPIN: 7354-5502; ORCID: 0000-0003-0858-6619;
E-mail: siluckova@yandex.ru

Received: 27.05.2024 **Revised: 03.07.2024** **Accepted: 30.09.2024**
Поступил: 27.05.2024 **Одобрена: 03.07.2024** **Принята: 30.09.2024**