

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)
- BAK (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://transsyst.ru/>
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>

ISSN 2782-3733 (Online)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 11 | № 1 | 2025

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;
Воробьев 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 Дегендорфской 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 Паньятиватского 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 Хён-Сук, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

**"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://transsyst.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>)

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 11 | Issue 1 | 2025

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

Рыжов В.Ю., Рыжов Ю.В.

Городские железные дороги как фактор развития транспортных систем в российских регионах5

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Лисов А.А., Возмилов А.Г.

Система электронного дифференциала на основе нейронных сетей для электромобилей: развитие, адаптация и перспективы применения24

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

Мартиросян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В.

Магнитные и транспортные характеристики элементов ВТСП генератора на основе незамкнутых сверхпроводящих обмоток43

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

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

Оптимальные алгоритмы многофазной широтно-импульсной модуляции по критерию дисперсии тока в нагрузке60

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Штанке В.В., Соломин В.А., Соломин А.В.

Система счета и диагностики колесных пар железнодорожного подвижного состава78

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

Сугоровский А.В., Сугоровский Ан.В.

Моделирование территориального расположения диспетчерских центров управления перевозками полигонного уровня98

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Федосеев Н.А., Ермошин Н.А., Алексеев С.В.

Методика определения контактных напряжений под вальцом вибрационного катка115

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Петроченко М.В.

Методика оценки качества кадрового потенциала проектной группы и влияние квалификации на проектные риски134

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Фёдорова М.В.

Экономическая оценка совершенствования перевозочного процесса за счет внедрения технологии блокчейн152

CONTENTS

REVIEWS

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

Ryzhov V.Yu., Ryzhov Yu.V.

Urban railways as a development driver for transport systems in Russian regions5

ORIGINAL STUDIES

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Lisov A.A., Vozmilov A.G.

Electronic differential system based on neural networks for electric vehicles: development, customization and prospects of application24

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Martirosian I.V., Aleksandrov D.A., Pokrovskii S.V.

Magnetic and transport characteristics of elements of HTS generator based on open-loop superconducting coils43

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Saushev A.V., Belousov I.V., Samoseiko V.F., Guskov V.O.

Optimal algorithms of multiphase pulse width modulation based on load current dispersion60

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Rolling stock of railways, train traction and electrification

Shtanke V.V., Solomin V.A., Solomin A.V.

Counting and diagnostics system for wheelsets of railway rolling stock.....78

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

Sugorovsky A.V., Sugorovsky An.V.

Simulation of setting up of operating territory transportation control centers based on territorial characteristics98

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Fedoseev N.A., Ermoshin N.A., Alekseev S.V.

Method for determining surface stresses under the roller of a vibrating roller115

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Petrochenko M.V.

Methods for assessing the quality of the talent pool in a project team and how their skills influence the project risks134

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Fedorova M.V.

Feasibility study of the transportation process improvement due to blockchain implementation152

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst642741>

© В.Ю. Рыжов¹, Ю.В. Рыжов²

¹ Российский университет транспорта
(Москва, Россия)

² Южный федеральный университет
(Таганрог, Россия)

ГОРОДСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В РОССИЙСКИХ РЕГИОНАХ

Обоснование. В условиях ограниченных бюджетных средств создание новых транспортных систем российских регионов делает внедрение городских железных дорог, использующих существующую инфраструктуру, привлекательным решением.

Цель. Изучение влияния городских железных дорог на развитие транспортных систем и выявление ключевых факторов, способствующих росту этого направления.

Материалы и методы. Исследование основано на анализе статистических данных и иных источников, с использованием сравнительного анализа.

Результаты. Рассмотрены примеры реализации проектов городских железных дорог в Московской агломерации, Нижнем Новгороде, Красноярске и Ростове-на-Дону. Оценены ключевые показатели эффективности интеграции данного транспорта в городскую инфраструктуру.

Ключевые слова: городские железные дороги; транспортные системы; транспортное планирование; региональное развитие.

Как цитировать:

Рыжов В.Ю., Рыжов Ю.В. Городские железные дороги как фактор развития транспортных систем в российских регионах // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 5–23. doi: 10.17816/transsyst642741

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

© V.Yu. Ryzhov¹, Yu.V. Ryzhov²

¹ Russian University of Transport (MIIT)

(Moscow, Russia)

² Southern Federal University

(Taganrog, Russia)

URBAN RAILWAYS AS A DEVELOPMENT DRIVER FOR TRANSPORT SYSTEMS IN RUSSIAN REGIONS

Background. In circumstances where budgetary funds are limited, building new transport systems in Russian regions makes deployment of urban railways using the existing infrastructure an attractive solution.

Aim. To study the impact of urban railways on the development of transport systems and to identify key drivers contributing to the growth of this trend.

Materials and Methods. The study is based on the analysis of statistical data and other sources, using comparative analysis.

Results. We considered the examples of the implementation of urban railway projects in the Moscow metropolitan area, Nizhny Novgorod, Krasnoyarsk and Rostov-on-Don. We assessed the key performance indicators for the integration of this means of transport into the urban infrastructure.

Keywords: urban railways; transport systems; transport planning; regional development.

To cite this article:

Ryzhov VYu, Ryzhov YuV. Urban railways as a development driver for transport systems in russian regions. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):5–23. doi: 10.17816/transsyst642741

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные системы российских мегаполисов на протяжении последних 30 лет не претерпели значительных изменений, хотя городские функции и связи за этот период заметно трансформировались. Рост городского населения, расширение агломераций, новые пространства и точки притяжения привели к изменению потребностей в транспортной инфраструктуре. Современные жители крупных городов нуждаются в быстром, вместительном и эффективном транспорте, который позволял бы легко перемещаться в соответствии с их потребностями. Однако создание совершенно новой транспортной системы требует значительных экономических ресурсов, а возможности региональных и городских бюджетов ограничены. В таких условиях все чаще внимание обращается на уже существующую железнодорожную инфраструктуру, которая может быть адаптирована под нужды городского транспорта. Это стало основой для запуска в российских городах-миллионниках проектов «городских электричек» – тренда, который набирает популярность в последнее десятилетие.

Цель исследования – изучить влияние внедрения городских железных дорог на развитие транспортных систем в регионах, а также выявить ключевые факторы, способствующие росту этого направления в условиях ограниченных бюджетов.

Задачи исследования:

- проанализировать текущую ситуацию с внедрением городских железных дорог в крупных городах России, на примере конкретных проектов (в Московской агломерации, в городах Нижний Новгород, Красноярск, Ростов-на-Дону);
- оценить роль городских железных дорог в улучшении городской и пригородной транспортной инфраструктуры;
- изучить экономическое и социальное влияние городских железных дорог на повседневную жизнь жителей регионов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования основана на анализе статистических данных о развитии сети городских железных дорог в российских регионах, а также на изучении существующей научной литературы и публикаций в СМИ по данной теме. В работе были использованы такие общенаучные методы исследования как системный подход, обобщение, анализ. Проведенный анализ основывается на методе сравнения, изучении

опыта разных городов, оценке пассажиропотока, а также социальных и экономических показателях, позволяющих глубже понять восприятие этого транспорта населением.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Говоря о современных российских городах-миллионниках, невозможно избежать термина «городская агломерация». Это понятие является ключевым для понимания структуры и динамики развития крупных городов и их транспортных систем. В научной литературе существует множество различных определений городской агломерации, но наиболее релевантным для темы настоящего исследования представляется определение, предложенное Е.Н. Перциком. Согласно ему, городская агломерация – это «система территориально сближенных и экономически взаимосвязанных населенных мест, объединенных устойчивыми трудовыми, культурно-бытовыми и производственными связями, общей социальной и технической инфраструктурой, а также интенсивными маятниковыми передвижениями» [1].

Традиционная структура городской агломерации включает ядро в виде города-центра и города-спутники, образующие так называемый пояс спутников – пригородную зону. Этот пояс активно участвует в обмене рабочей силой и ресурсами с ядром агломерации, поддерживая интенсивные маятниковые миграции. В данном исследовании основной акцент будет сделан на городской составляющей транспортной инфраструктуры крупнейших мегаполисов. Однако, поскольку городские железные дороги играют ключевую роль не только во внутренней системе перевозок, но и в обеспечении связей с пригородами, исследование неизбежно затронет и аспекты пригородного сообщения. Это позволит получить более полное представление о функционировании железнодорожного транспорта в масштабах всей агломерации [2].

Проблема развития транспортных систем в российских мегаполисах обострилась с ускорением урбанизации и увеличением численности населения в городах. Городские дороги перегружены автомобильным транспортом, что приводит к регулярным пробкам, снижению скорости передвижения и росту уровня загрязнения воздуха [3]. Эти факторы негативно сказываются на качестве жизни горожан и требуют комплексных решений, направленных на оптимизацию транспортных потоков. При этом строительство новых линий метро или других видов транспорта часто оказывается слишком затратным для региональных бюджетов,

что создает необходимость поиска более доступных и эффективных решений [4]. В таких условиях городские железные дороги, использующие существующую железнодорожную инфраструктуру, становятся привлекательным вариантом для многих городов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования мы рассмотрим конкретные примеры реализации проектов городских железных дорог в московской агломерации, а также крупных российских городах, таких как Нижний Новгород, Красноярск и Ростов-на-Дону. Каждый из этих городов представляет собой уникальный пример развития транспортной инфраструктуры с использованием «городской электрички» как инструмента для улучшения мобильности и решения транспортных проблем. Анализ этих примеров позволит выявить как успешные решения, так и трудности, с которыми столкнулись регионы при использовании этого инструмента.

Для оценки успешности интеграции городских железных дорог в транспортные системы вышеупомянутых городов авторами предложена методика, основанная на четырех ключевых показателях: охват «электричкой» районов города, наличие пересадок на другие виды транспорта, гибкость расписания и интервалы движения, а также уровень пассажиропотоков относительно других видов транспорта. Эти показатели позволяют получить объективную картину интеграции городских железных дорог в общую транспортную сеть каждого города, а также оценить успехи и проблемы, с которыми столкнулись проекты на разных стадиях их реализации.

Московская агломерация

Выше было приведено определение городской агломерации, предложенное Е.Н. Перциком [1], которому московская агломерация полностью соответствует. Она представляет собой систему территориально сближенных и экономически взаимосвязанных населенных пунктов, объединенных интенсивными маятниковыми миграциями, общей социальной и технической инфраструктурой, а также устойчивыми трудовыми, культурными и производственными связями. Москва выступает ядром этой агломерации, притягивая значительную часть рабочей силы из городов-спутников и прилегающих районов Московской области. Ежедневно миллионы человек совершают поездки в столицу

и обратно, что формирует высокий спрос на транспортные услуги и требует эффективной интеграции различных видов транспорта. Взаимозависимость центра и периферийных территорий проявляется не только в маятниковых миграциях, но и в развитии единой хозяйственной системы, общей логистической инфраструктуры и транспортных потоков, обеспечивающих устойчивое функционирование агломерации.

До реализации проектов Московского центрального кольца (МЦК) и Московских центральных диаметров (МЦД) пригородные железнодорожные перевозки в агломерации характеризовались рядом проблем. Основными из них были перегруженность центральных железнодорожных вокзалов, недостаточная интеграция с другими видами городского транспорта и устаревшая инфраструктура. Пассажиры сталкивались с неудобными пересадками, длительным временем ожидания и отсутствием единой системы оплаты проезда.

Первым шагом к модернизации железнодорожной системы стало открытие в 2016 году МЦК. Сейчас МЦК представляет собой кольцевую линию длиной 54 км, включающую 31 станцию, 17 из которых имеют пересадки на метро и другие виды транспорта. Интервал движения поездов составляет около 5–6 минут в часы пик. За первые пять лет работы МЦК перевезло более 681 млн пассажиров, что свидетельствует о высокой востребованности этого вида транспорта [5].

Продолжением интеграции железнодорожной системы стали Московские центральные диаметры (МЦД). Первый и второй диаметры (МЦД-1 «Белорусско-Савеловский» и МЦД-2 «Курско-Рижский») были запущены в 2019 году. МЦД-1 соединяет Одинцово и Лобню, протяжённость маршрута составляет 52 км с 28 станциями, из которых 4 новые. МЦД-2 связывает Нахабино и Подольск, его длина — 80 км, включает 38 станций, 8 из которых новые. В 2023 году были открыты МЦД-3 «Ленинградско-Казанский» и МЦД-4 «Калужско-Нижегородский», что увеличило общее количество станций до 137. За 2024 год на МЦД было совершено более 400 млн поездок, а рекордное количество поездок за один день достигло почти 1,5 млн [6].

Внедрение проектов МЦК и МЦД оказало значительное экономическое и социальное влияние на Московскую агломерацию. Сократилось время в пути для миллионов пассажиров, улучшилась транспортная доступность отдалённых районов, снизилась нагрузка на центральные вокзалы и линии метро. Кроме того, развитие транспортной инфраструктуры способствовало повышению инвестиционной привлекательности

прилегающих территорий, стимулировало развитие бизнеса и создание новых рабочих мест. В перспективе планируется дальнейшее расширение сети МЦД, включая проект Центрального транспортного узла (ЦТУ), который предусматривает интеграцию с транспортными системами соседних регионов, таких как Тверь, Калуга и Тула. Это позволит создать единую транспортную систему, обеспечивающую быстрое и комфортное перемещение между городами Центральной России [7].

Развитие системы пригородно-городских железнодорожных перевозок в московской агломерации стало ключевым этапом в модернизации транспортной инфраструктуры страны, послужив ориентиром для внедрения аналогичных проектов в других регионах России. В данной статье рассмотрим системы городских поездов в Нижнем Новгороде, Красноярске и Ростове-на-Дону. Выбор этих городов обусловлен схожестью их агломерационных процессов, особенностей транспортных систем и накопленного опыта в реализации проектов городской железнодорожной инфраструктуры. Анализ их практик позволит выявить общие тенденции и характерные особенности развития пригородно-городских железнодорожных перевозок в российских регионах, а также определить наиболее эффективные подходы к дальнейшему совершенствованию транспортных систем крупных городских агломераций.

Нижний Новгород

«Городская электричка» Нижнего Новгорода была запущена первой в России в 2013 году, став пионером среди подобных проектов. Несмотря на первенство, настоящий импульс к развитию городских железных дорог в других регионах дал запуск Московского центрального кольца (МЦК) в 2016 году. МЦК стало эталонным проектом, показавшим возможности интеграции железнодорожных сетей с городским общественным транспортом.

Нижегородская городская железная дорога включает три основные линии: Первая Сормовская линия с 11 станциями, Вторая Сормовская линия с 4 станциями и Приокская с 13 станциями. Кроме того, существует направление Дзержинск – Доскино – Кустовая, которое не входит в систему, но интегрировано с ней благодаря пересадочным узлам.

Городские железные дороги имеют пересадочные узлы в местах пересечения с городскими автомобильными магистралями, например:

«Варя», «Проспект Гагарина», «Петряевка» и другие. Всего система имеет две пересадки на станции метро, и порядка 18 на автобусы и прочий наземный транспорт [8].

Система оплаты интегрирована с городским транспортом через тарифы «электронный кошелек», позволяя пассажирам легко пересаживаться на другие виды транспорта, что также свидетельствует о высоком уровне интеграции.

Расписание движения различается по линиям: на 1-й Сормовской линии интервалы в часы пик составляют 15 минут; на 2-й Сормовской линии реализовано тактовое движение в утреннее и вечернее время, а интервалы достигают 30 минут; Приокская линия имеет интервал в 1 час в утренние часы [8]. Такое расписание городских поездов демонстрирует среднюю гибкость — движение чаще всего ограничено пиковыми периодами, а вне пиков интервалы могут быть слишком большими для повседневных поездок.

Известно, что в 2023 году общественный транспорт Нижнего Новгорода перевез порядка 220 млн пассажиров. В это число входят автобусы, троллейбусы, трамваи и метро [9]. На городские поезда в том же году пришлось около 1,5 млн пассажиров, что составляет менее 1% от общего числа. Тем не менее, наблюдается ежегодный рост количества перевезенных пассажиров городскими железными дорогами по сравнению с предыдущими годами [10].

Городская железная дорога охватывает ключевые районы Нижнего Новгорода, включая центр и крупные жилые массивы, такие как Сормовский и Канавинский районы. Остановочные пункты расположены вдоль значимых городских автомобильных магистралей, что улучшает доступность городских поездов для жителей близлежащих районов. Более подробная информация по показателям в рамках предложенной методики представлена ниже в Табл. 1.

Городская железная дорога Нижнего Новгорода показывает умеренный уровень интеграции с городской транспортной системой. К преимуществам можно отнести наличие удобных пересадок на другие виды транспорта и интегрированную систему оплаты, а также тактовое движение на некоторых участках. Однако недостаточная гибкость расписания в целом и тяжелая конкуренция с привычными видами транспорта лишают городские поезда значительного числа пассажиров, что, впрочем, не мешает проекту развиваться дальше.

Таблица 1. Основные показатели интеграции городской железной дороги в транспортную систему Нижнего Новгорода

Table 1. Key indicators of integration of the urban railway into the transport system of Nizhny Novgorod

№	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Охват городской железной дорогой районов города	Кол-во, ед.	7
2	Наличие пересадок на другие виды транспорта	Кол-во, ед.	Около 20
3	Гибкость расписания и интервалы движения	Мин, в среднем	15–60
4	Уровень пассажиропотоков относительно других видов транспорта	%, от общего числа (2023 г.)	0,68

Красноярск

Городская железная дорога Красноярска запущена в 2014 году и стала связующей артерией для 6 из 7 районов Красноярска и Дивногорска [11].

Транспортная система городской железной дороги включает 30 остановочных пунктов, среди которых 9 находятся на направлении от станции Енисей до станции Дивногорск, а всего количество пересадок на наземный транспорт достигает 21 [12]. За последние годы в рамках развития городской железной дороги было построено 8 новых остановок в густонаселенных районах, таких как «Белые росы» и «Тихие зори», а также обновлены 15 платформ и 3 вокзала (Дивногорск, Енисей, Злобино) [11].

В Красноярске ежедневно курсируют тридцать пар электропоездов (десять из них – только в пределах города). Городская железная дорога обеспечивает регулярное сообщение для жителей в часы пик, минимизируя зависимость от дорожных пробок. При этом время в пути сокращается минимум в полтора раза по сравнению с другими видами общественного транспорта, что позволяет сократить время от отдаленных районов до центра города как минимум на тридцать минут [13]. Согласно данным из сервиса Яндекс.Расписания в среднем интервал движения в одном направлении в часы-пик составляет 15–20 минут, а в остальное время до полутора часов.

В 2023 году городскими электропоездами Красноярска было перевезено более 2 миллионов пассажиров, что на 10% больше,

чем в 2022 году, и демонстрирует устойчивый рост по сравнению с предыдущими годами: 30% по отношению к 2021 году, 62% к 2020 году и 22% к 2019 году [14]. Несмотря на положительную динамику пассажиропотока, этот показатель составляет лишь небольшую долю от общего объема перевозок в городе, где ежегодно общественным транспортом пользуются около 179 миллионов пассажиров [15]. Более подробные показатели представлены ниже в Табл. 2.

Таблица 2. Основные показатели интеграции городской железной дороги в транспортную систему Красноярска

Table 2. Key indicators of integration of the urban railway into the transport system of Krasnoyarsk

№	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Охват городской железной дорогой районов города	Кол-во, ед.	6
2	Наличие пересадок на другие виды транспорта	Кол-во, ед.	Около 21
3	Гибкость расписания и интервалы движения	Мин, в среднем	15–90
4	Уровень пассажиропотоков относительно других видов транспорта	%, от общего числа (2023 г.)	Свыше 1

Не смотря на то, что сегодня электропоезда становятся все более популярным выбором среди красноярцев, они еще находятся в тени традиционных видов общественного транспорта, таких как автобусы и троллейбусы. Городская железная дорога Красноярска в последние годы демонстрирует развитие благодаря строительству новых платформ и остановок, что значительно улучшает доступность и комфорт для пассажиров. Удачные «вытянутая» конфигурация территории города и расположение железнодорожных путей, проходящих через всю территорию, способствует интеграции городской железной дороги в транспортную систему и облегчает передвижение жителей между районами. Отсутствие конкуренции со стороны метро, которое не функционирует в Красноярске, также создает условия для роста популярности этого вида транспорта, делая его важным элементом городской транспортной сети. Такие благоприятные условия позволяют

властям строить планы на развитие системы: в будущем планируется замыкание двух веток электрички в кольцо.

Ростов-на-Дону

«Городская электричка» в Ростове-на-Дону была запущена в 2016 году. Изначально на маршрутах курсировало всего три пары поездов, но с течением времени маршруты были расширены. На 2020 год движение городских электропоездов осуществляется по пяти основным маршрутам:

- Ростов-Главный – Ростов-Западный;
- Ростов-Западный – Кизитеринка;
- Ростов-Западный – Ростов-Главный;
- Кизитеринка – Ростов-Западный;
- Ростов-Главный – Кизитеринка.

Маршруты электропоездов охватывают почти все районы города, при этом транспортная система имеет 18 остановочных пунктов и всего около 5 крупных пересадок на наземный транспорт. Городская железная дорога значительно сокращает время в пути для пассажиров в условиях городских пробок, что делает электричку конкурентным видом общественного транспорта [16]. По данным сервиса Яндекс.Расписания, интервалы движения с учетом пригородных электропоездов в область, в утренние и вечерние часы-пик порядка 15 минут, а в остальное время от 30 минут до часа.

В 2023 году пассажиропоток городской железной дороги в Ростове-на-Дону составил около 200 тысяч человек. Несмотря на рост в 5,6 раз за семь лет с момента запуска проекта, системе приходится обслуживать сравнительно небольшое количество пассажиров по отношению к другим видам транспорта и даже к другим системам городских железных дорог, анализировавшимся в статье [17]. Для сравнения, в 2021 году общественным транспортом в Ростове-на-Дону было перевезено около 150 миллионов пассажиров, что подчеркивает, что городской железной дороге принадлежит всего около 0,13% от общего пассажиропотока города. Данные по пассажиропотокам всего транспорта за 2021 год остаются основой для анализа, так как более свежих данных пока нет [18]. Причиной таких невысоких пассажиропотоков у городских поездов могут быть в целом не такая протяженная сеть, как, например, в Красноярске или Нижнем Новгороде, а также отсутствие развитой пересадочной системы, что делает городской железнодорожный транспорт менее

привлекательным по сравнению с альтернативами. В табл. 3 представлены более подробные данные по городской железной дороге Ростова-на-Дону.

Таблица 3. Основные показатели интеграции городской железной дороги в транспортную систему Ростова-на-Дону

Table 3. Key indicators of the integration of the urban railway into the transport system of Rostov-on-Don

№	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Охват городской железной дорогой районов города	Кол-во, ед.	Около 6
2	Наличие пересадок на другие виды транспорта	Кол-во, ед.	Около 5
3	Гибкость расписания и интервалы движения	Мин, в среднем	15-60
4	Уровень пассажиропотоков относительно других видов транспорта	%, от общего числа (2023 г.)	0,13

Таким образом, городская железная дорога Ростова-на-Дону, как и в Красноярске и Нижнем Новгороде, играет важную роль в обеспечении транспортной доступности, связывая большинство районов города. Однако, в отличие от этих городов, городская железная дорога Ростова-на-Дону имеет значительно меньший потенциал для развития как часть внутренней транспортной системы в основном из-за сложности модернизации инфраструктуры и увеличения провозной способности в городской черте, при этом имея возможность развиваться как полноценная агломерационная транспортная система.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Развитие городских железных дорог оказывает значительное влияние на уровень жизни населения. Исторически сложившееся восприятие пригородных электропоездов как транспорта, предназначенного в основном для поездок на дальние расстояния — на дачи или в загородные зоны, постепенно меняется. Становление электропоездов частью транспортных систем крупных городов трансформирует их роль, делая этот вид транспорта не только средством сообщения между пригородами, но и полноценным внутригородским транспортом подобно метрополитену.

Городские железные дороги помогают сократить время в пути, а благодаря удобным пересадкам и интеграции с другими видами общественного транспорта, городские поезда могут стать привлекательным решением для ежедневных поездок на работу, учебу или по делам.

С точки зрения социальной доступности, городские железные дороги предоставляют доступное транспортное решение для всех слоев населения, в том числе для людей с низким уровнем дохода. Введение пересадочных тарифов и льготных условий делает поездки более экономичными, что способствует росту популярности городских железных дорог среди различных категорий населения. Они предоставляют быстрый и доступный способ передвижения, который зачастую может быть более экономичным, чем использование автомобилей или такси.

Содержимое Табл. 1–3 для наглядности представлено на Рис. Поскольку там содержатся различные виды показателей, они представлены в нормированном виде (максимальное значение каждого показателя было принято за единицу).

Городская железная дорога Нижнего Новгорода демонстрирует высокий уровень охвата территорий. В Красноярске городская железная дорога показывает рост пассажиропотока на фоне оптимальных интервалов движения и хорошего охвата районов города. В Ростове-на-Дону, несмотря

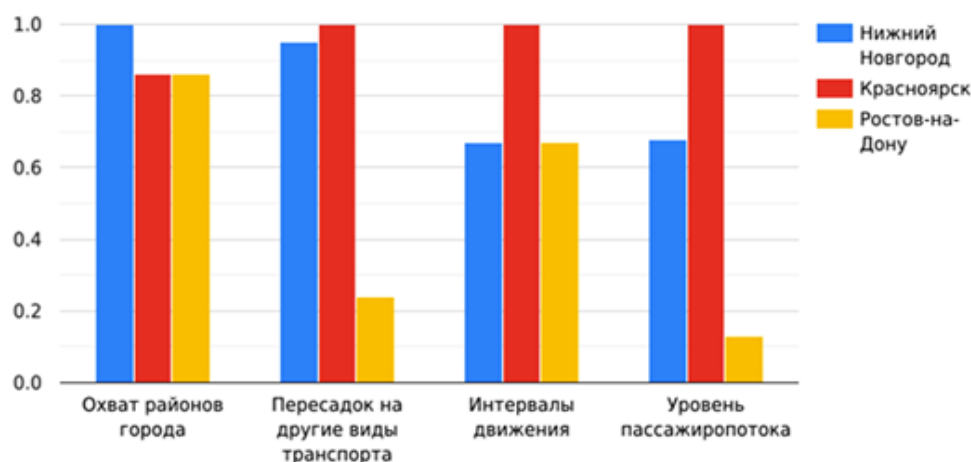


Рис. Основные показатели интеграции городской железной дороги в транспортные системы Нижнего Новгорода, Красноярска, Ростова-на-Дону (нормированные на максимальное значение показателя)

Fig. Key indicators of the integration of the urban railway into the transport systems of Nizhny Novgorod, Krasnoyarsk, Rostov-on-Don (normalized to the maximum value of the indicator)

на постепенное развитие, городская железная дорога отстает по уровню интеграции, показывая ограниченный пассажиропоток и низкий уровень пересадок на другие виды транспорта при сопоставимом с другими охвате районов города.

Постепенно происходит и изменение восприятия населением пригородного железнодорожного транспорта. Во многом этот процесс стимулируется городскими властями и транспортными компаниями, которые активно продвигают идеи экологически чистого и удобного транспорта. Кампании по продвижению «городской электрички» подчеркивают ее достоинства — скорость, комфорт и доступность, что способствует изменению общественного мнения. Этот транспорт начинает восприниматься как неотъемлемая часть городской инфраструктуры, а не как устаревший способ передвижения, предназначенный только для дальних поездок.

В работе [19] приводится градация критериев оценки социально-экономических эффектов от использования городских железных дорог на основе европейского опыта в той же области: это экономические, социальные и экологические выгоды. Применяя их к исследуемым городам (Нижний Новгород, Красноярск, Ростов-на-Дону), можно выделить несколько ключевых аспектов и оценить социальный эффект через социальную доступность, рост использования общественного транспорта, и городскую регенерацию, и экономический эффект через сокращение времени в пути, экономическую эффективность, создание рабочих мест и экономический рост.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

В Красноярске и Нижнем Новгороде городская железная дорога стала доступным видом транспорта для жителей отдаленных районов, предлагая быстрое и удобное сообщение с центром города. В Ростове-на-Дону сеть менее развита, что сдерживает ее доступность для широкой аудитории. Также в Нижнем Новгороде и Красноярске отмечен значительный рост числа пассажиров благодаря развитию системы городской железной дороги. В Ростове-на-Дону этот показатель также растет, хотя пока общий вклад в пассажиропоток значительно меньше. Говоря о городской регенерации, можно сделать вывод, что в Нижнем Новгороде и в особенности в Красноярске станции городской железной дороги способствуют развитию районов, повышая их привлекательность для бизнеса и жилья за счет строительства новых платформ и развития существующих железнодорожных направлений. В Ростове-на-Дону регенерация пока менее выражена.

Говоря об экономических последствиях, можно предположить, что в Красноярске и Нижнем Новгороде запуск городской железной дороги привел к сокращению времени в пути для жителей отдаленных районов и пригородов, что позволило пассажирам быстрее добираться до работы и снизить транспортные издержки. Это, в свою очередь, повысило экономическую эффективность транспортной системы, сократив затраты на топливо и эксплуатацию личных автомобилей. Благодаря развитию инфраструктуры создается множество новых рабочих мест, растет привлекательность районов, прилегающих к железной дороге. Все это способствует экономическому росту регионов за счет увеличения доступности трудовых ресурсов и стимулирования деловой активности. В Ростове-на-Дону положительное влияние городской железной дороги также заметно, однако масштаб ее экономического эффекта пока ниже ввиду ограничений, разобранных в статье выше.

Кроме того, важно отметить статус городской железной дороги как внеуличного вида транспорта, что, безусловно, улучшает безопасность передвижения, снижая количество дорожно-транспортных происшествий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании была предложена авторская методика, основанная на четырех показателях: охват электропоездами районов города, наличие пересадок на другие виды транспорта, гибкость расписания и интервалы движения, а также уровень пассажиропотоков относительно других видов транспорта. Благодаря этой методике, была определена значимость городских железных дорог как эффективного и перспективного компонента транспортной системы крупных городов России, таких как Нижний Новгород, Красноярск и Ростов-на-Дону. Выявлено, что развитие этих систем приводит к сокращению времени поездок, улучшению транспортной доступности отдаленных районов и уменьшению нагрузки на другие виды транспорта. Однако, несмотря на успехи, доля городской железной дороги в общем объеме пассажиропотока остается сравнительно небольшой, особенно в Ростове-на-Дону, что свидетельствует о необходимости дополнительных мер по популяризации этого вида транспорта.

Рекомендациями для дальнейшего развития являются: улучшение частоты движения поездов, расширение маршрутов, охватывающих большее число районов, интеграция с другими видами общественного транспорта через пересадочные узлы, а также активное информирование

и продвижение преимуществ городской электрички среди горожан. Особое внимание следует уделить снижению барьеров для пользования железной дорогой и поддержанию конкурентных тарифов.

Развитие городских железных дорог оказывает значительное влияние на социальную доступность и качество городской среды, что отражается в следующем. Во-первых, городские поезда способствуют увеличению использования общественного транспорта, что снижает нагрузку на другие виды транспорта и уменьшает транспортную усталость. Также они поддерживают социальную справедливость, предлагая доступный и быстрый транспорт для широких слоев населения, особенно тех, кто живет на периферии. Во-вторых, проекты городских железных дорог помогают в обновлении городских районов, стимулируя развитие инфраструктуры вблизи остановочных пунктов.

Результаты исследования могут быть использованы в дальнейшем анализе транспортной политики городов, при разработке стратегий повышения социальной значимости и эффективности железнодорожного транспорта, для изучения факторов, влияющих на пассажиропоток. Также их можно использовать для формирования предложений по интеграции городской железной дороги в общие планы транспортного развития.

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. Перцик Е.Н. Крупные городские агломерации: развитие, проблемы проектирования. В кн.: Проблемы развития агломераций России. М.: КРАСАНД, 2009. С. 34–46.
2. Кельбах В. С. Транспортная инфраструктура как элемент городской агломерации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2013. № 2. С. 135–144.
3. Федулов Г.А., Муратова А.В., Минин Д.П. Современные проблемы городского транспорта в крупных городах // Образование. Наука. Прорыв: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 31 января 2024 года. Петрозаводск, 2024. С. 71–79.

4. CIAN.RU. Метро в России: карта ожиданий и разочарований. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.cian.ru/stati-metro-v-rossii-karta-ozhidaniy-i-razocharovaniy-320283/>
5. Годовой отчет ОАО «РЖД» за 2021 г. Пассажирские перевозки в пригородном сообщении. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/passenger-transportation/commuter-service>
6. Московский транспорт. Подводим итоги 2024 года на МЦД. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/122841
7. РБК Недвижимость. Собянин рассказал о планах развития транспортной системы Москвы. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://realty.rbc.ru/news/65d31c2c9a794748a3af7f9a>
8. ВВППК.RU. Городская электричка в городе Нижний Новгород. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.vvppk.ru/gorodskaya-elektrichka-v-gorode-nizhniy-novgorod/>
9. Нижегородская правда. 220 млн человек перевез общественный транспорт в Нижнем Новгороде в 2023 году. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://pravda-nn.ru/news/220-mln-chelovek-stali-passazhirami-nizhegorodskogo-obshhestvennogo-transporta/>
10. Новости Нижнего Новгорода. Городские электрички Нижнего Новгорода в 2023 году перевезли 1,5 млн пассажиров. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.niann.ru/?id=600446>
11. Бугаева З.Ф., Левицкая В.А. Проект «городская электричка» компании АО «Краспригород» // Актуальные исследования. 2023. № 12-2(142). С. 31–32.
12. Официальный сайт администрации города Красноярска. Городская электричка в Красноярске. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.kraspg.ru/passenger/gorodskaya-elektrichka/>
13. Немченко М.Ю. Пригородные перевозки в г. Красноярске. В кн.: Молодежная наука Сибирского региона: Труды XXIII Межвузовской научно-практической студенческой конференции КРИЖТ ИрГУПС, в 2-х т., Красноярск, 24 мая 2019 года / отв. ред. В.С. Ратушняк. Том 1. Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2019. С. 234–236.
14. Деловой квартал DK.RU. Пассажиропоток городской электрички в Красноярске превысил 2 млн. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://krasnoyarsk.dk.ru/news/237194114>
15. Официальный сайт администрации города Красноярска. Транспорт. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.admkrsk.ru/citytoday/transport/Pages/default.aspx>
16. АО «СКППК». Городская электричка. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://skppk.ru/passazhiram/gorodskaya-elektrichka>
17. Деловая газета Юг. Пассажиропоток городской электрички в Ростове за семь лет вырос в 5,6 раза. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.dg-yug.ru/news/20136099.html>

18. ROSTOF.RU. За 2021 год в Ростове перевезено 150 млн пассажиров. Дата обращения: 01.02.2025. Режим доступа: <https://www.rostof.ru/articles/za-2021-god-v-rostove-perevezeno-150-mln-passazhirov>
19. Намиот Д.Е., Кутуzmanов З.М., Федоров Е.А., Покусаев О.Н. Об оценке социально-экономических эффектов городской железной дороги // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Т. 6, № 1. С. 92–103.

REFERENCES

1. Pertsik EN. Krupnye gorodskie aglomeratsii: razvitie, problemy proektirovaniya. *Problemy razvitiya aglomeratsii Rossii*. Moscow; 2009:34-46. (In Russ.)
2. Kel'bach VS. Transportnaya infrastruktura kak element gorodskoi aglomeratsii. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2013;2:135-144. (In Russ.)
3. Fedulov GA, Muratova AV, Minin DP. Sovremennye problemy gorodskogo transporta v krupnykh gorodakh. *Obrazovanie. Nauka. Proryv*. Sbornik statei Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa, Petrozavodsk, 2024 January 31. Petrozavodsk; 2024:71–79. (In Russ.)
4. CIAN.RU. Metro v Rossii: karta ozhidanii i razocharovanii. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.cian.ru/stati-metro-v-rossii-karta-ozhidaniy-i-razocharovaniy-320283/> (In Russ.)
5. Godovoj otchet OAO «RZHD» za 2021 g. Passazhirskie perevozki v prigorodnom soobshchenii. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://ar2021.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/passenger-transportation/commuter-service> (In Russ.)
6. Moskovskij transport. Podvodim itogi 2024 goda na MCD. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/122841 (In Russ.)
7. RBK Nedvizhimost'. Sobyatinin rasskazal o planah razvitiya transportnoj sistemy Moskvy. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://realty.rbc.ru/news/65d31c2c9a794748a3af7f9a> (In Russ.)
8. VVPPK.RU. Gorodskaya elektrichka v gorode Nizhnii Novgorod. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.vvppk.ru/gorodskaya-elektrichka-v-gorode-nizhniy-novgorod/> (In Russ.)
9. Nizhegorodskaya pravda. 220 mln chelovek perevez obshchestvennyi transport v Nizhnem Novgorode v 2023 godu. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://pravda-nn.ru/news/220-mln-chelovek-stali-passazhirami-nizhegorodskogo-obshhestvennogo-transporta/> (In Russ.)
10. Novosti Nizhnego Novgoroda. Gorodskie elektrichki Nizhnego Novgoroda v 2023 godu perevezli 1,5 mln passazhirov. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.niann.ru/?id=600446> (In Russ.)
11. Bugaeva ZF, Levitskaya VA. Proekt “gorodskaya elektrichka” kompanii AO “Krasprigorod”. *Aktual'nye issledovaniya*. 2023;12-2(142);31–32. (In Russ.)

12. Ofitsial'nyi sait administratsii goroda Krasnoyarska. Gorodskaya elektrichka v Krasnoyarske. [Internet]. [cited 2024 December 1]. Available from: <https://www.kraspg.ru/passenger/gorodskaya-elektrichka/> (In Russ.)
13. Nemchenko MYu. Prigorodnye perevozki v g. Krasnoyarske. In: Ratushnyak VS, editor. *Molodezhnaya nauka Sibirskogo regiona: Proceedings of the XXIII Interuniversity Scientific and Practical Student Conference of KrIZhT IrGUPS*, in 2 volumes, Krasnoyarsk, 2019 May 24. Krasnoyarsk; Vol. 1. 2019:234–236. (In Russ.)
14. Delovoi kvartal DK.RU. Passazhiropotok gorodskoi elektrichki v Krasnoyarske prevysil 2 mln. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://krasnoyarsk.dk.ru/news/237194114> (In Russ.)
15. Ofitsial'nyi sait administratsii goroda Krasnoyarska. Transport. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.admkrsk.ru/citytoday/transport/Pages/default.aspx> (In Russ.)
16. AO "SKPPK". Gorodskaya elektrichka. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://skppk.ru/passazhiram/gorodskaya-elektrichka> (In Russ.)
17. Delovaya gazeta Yug. Passazhiropotok gorodskoi elektrichki v Rostove za sem' let vyros v 5,6 raza. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.dg-yug.ru/news/20136099.html> (In Russ.)
18. ROSTOF.RU. Za 2021 god v Rostove perevezeno 150 mln passazhirov. [Internet]. [cited 2025 February 1]. Available from: <https://www.rostof.ru/articles/za-2021-god-v-rostove-perevezeno-150-mln-passazhirov> (In Russ.)
19. Namiot DE, Kutuzmanov ZM, Fedorov EA, Pokusaev ON. Ob otsenke sotsial'no-ekonomicheskikh effektiv gorodskoi zheleznoi dorogi. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018;6(1):92-103. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Рыжов Виталий Юрьевич, студент;

eLibrary SPIN: 1049-6810; ORCID: 0009-0008-1282-1646;

E-mail: ryzhoffvitaly@yandex.ru

Рыжов Юрий Владимирович, доктор культурологии, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 6863-7855; ORCID: 0009-0002-5895-8716;

E-mail: ausculita.fili@gmail.ru

Information about the authors:

Vitaly Yu. Ryzhov, student;

eLibrary SPIN: 1049-6810; ORCID: 0009-0008-1282-1646;

E-mail: ryzhoffvitaly@yandex.ru

Yuri V. Ryzhov, Doctor of Cultural Studies, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 6863-7855; ORCID: 0009-0002-5895-8716;

E-mail: ausculita.fili@gmail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst659809>

© А.А. Лисов, А.Г. Возмилов

Южно-Уральский государственный университет

(Челябинск, Россия)

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ: РАЗВИТИЕ, АДАПТАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Цель. Анализ возможностей и перспектив развития системы электронного дифференциала (СЭД) для электромобилей, основанной на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС).

Материалы и методы. Обсуждаются ключевые преимущества предложенной системы, такие как ее адаптивность к различным конструктивным конфигурациям автомобиля, интеграция дополнительных датчиков, поддержка беспилотного режима и возможность взаимодействия с системой ABS.

Результаты. Рассмотрены пути совершенствования модели, включая внедрение самообучающихся алгоритмов, оптимизацию инверторных схем для управления несколькими двигателями и реализацию полноприводных конфигураций. Также обсуждается адаптация СЭД для работы на маломощных устройствах с использованием методов квантизации, прореживания (pruning) и упрощения архитектуры.

Заключение. Предложенные подходы и алгоритмы имеют потенциал для широкого внедрения в индустрии электромобилей, открывая новые возможности для развития интеллектуальных систем управления транспортными средствами.

Ключевые слова: электронный дифференциал; электромобиль; нейронные сети; самообучение; инвертор; автономное вождение; оптимизация; интеграция ABS.

Как цитировать:

Лисов А.А., Возмилов А.Г. Система электронного дифференциала на основе нейронных сетей для электромобилей: развитие, адаптация и перспективы применения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 24–42. doi: 10.17816/transsyst659809

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, A.G. Vozmilov

South Ural State University

(Chelyabinsk, Russia)

ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS FOR ELECTRIC VEHICLES: DEVELOPMENT, ADAPTATION AND PROSPECTS OF APPLICATION

Aim. The analysis of possibilities and prospects of development of an electronic differential system for electric vehicles based on artificial neural networks.

Materials and Methods. We discuss the key advantages of the proposed system, such as its customization capability to various vehicle designs, integration of additional sensors, support for self-driving mode and the ability to interact with the ABS system.

Results. We considered the ways to improve the model, including the introduction of self-learning algorithms, optimization of inverter circuits for controlling multiple motors, and implementation of all-wheel drive configurations. In addition, we discuss the customization of the electronic differential system for operation on low-power devices using quantization, pruning and architecture simplification methods.

Conclusion. The proposed approaches and algorithms have the potential for widespread deployment in the electric vehicle industry, opening new vistas for development of intelligent vehicle control systems.

Keywords: electronic differential; electric vehicle; neural networks; self-learning; inverter; self-driving; optimization; ABS integration.

To cite this article:

Lisov AA, Vozmilov AG. Electronic differential system based on neural networks for electric vehicles: development, adaptation and prospects of application. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):24–42. doi: 10.17816/transsyst659809

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире наблюдается активный переход от использования транспорта, оснащенного двигателями внутреннего сгорания (ДВС), к электротранспорту. Как и в автомобилях с ДВС, в электромобилях тяговый двигатель выполняет ключевую функцию, обеспечивая движение транспортного средства. На данный момент, ведущие производители электроавтомобилей в качестве электропривода используют 2 и более тяговых электродвигателей. Для управления скоростью вращения электродвигателей в этом случае используется специализированный алгоритм – система электронного дифференциала (СЭД).

Ранее в исследованиях [1, 2] была предложена и разработана система электронного дифференциала на основе нейронных сетей, которая по сравнению с традиционными решениями [3, 4] имеет следующие преимущества:

1. Подходит для любых компоновок привода автомобиля (2, 4, 6, 8 тяговых двигателей).
2. Учитывает конструктив и внутренние параметры автомобиля (колесная база, длина, радиус колес, масса и др.).
3. Учитывает влияние погодных условий (температура, влажность, освещенность и др.);
4. Учитывает стиль вождения;
5. Пригодна для применения в беспилотном транспорте;
6. Отсутствует ограничение по диапазону скорости движения;
7. Модель нейронной сети (НС) легко заменить или обновить;
8. Учитывает состояние дорожного покрытия (асфальт, гравий, бездорожье);
9. Возможность интегрироваться в систему ABS, ESP, круиз-контроля и др;

Функциональная схема разработанной в рамках исследования системы для модели электромобиля с двумя ведущими двигателями сзади показана на Рис. 1, ее работа заключается в следующем. Микроконтроллер (МК) считывает показания с различных датчиков: скорости автомобиля (педаль акселератора), угла поворота рулевого колеса ($\delta_{руля}$), гироскопа, акселерометра и датчика температуры. Данные с датчиков отправляются на персональный компьютер (ПК), где нейронная сеть обрабатывает информацию и формирует предсказание (задание) скорости вращения колес. Значение данного задания возвращается на микроконтроллер,

который управляет скоростью вращения тяговых двигателей (М1 и М2) посредством силовых преобразователей, что обеспечивает эффективную работу системы управления движением электромобиля при совершении поворотов и маневров.

Результаты экспериментальной проверки эффективности работы системы при управлении тяговым приводом модели электромобиля показали высокие значения и перспективность данного решения [1, 2]. В связи, с этим в данной статье был предложен ряд возможностей для расширения функционала разработанной системы электронного дифференциала, повышения устойчивости и качества управления за счет расширения спектра применяемых датчиков и устранения недостатков, выявленных во время практической проверки работоспособности СЭД.

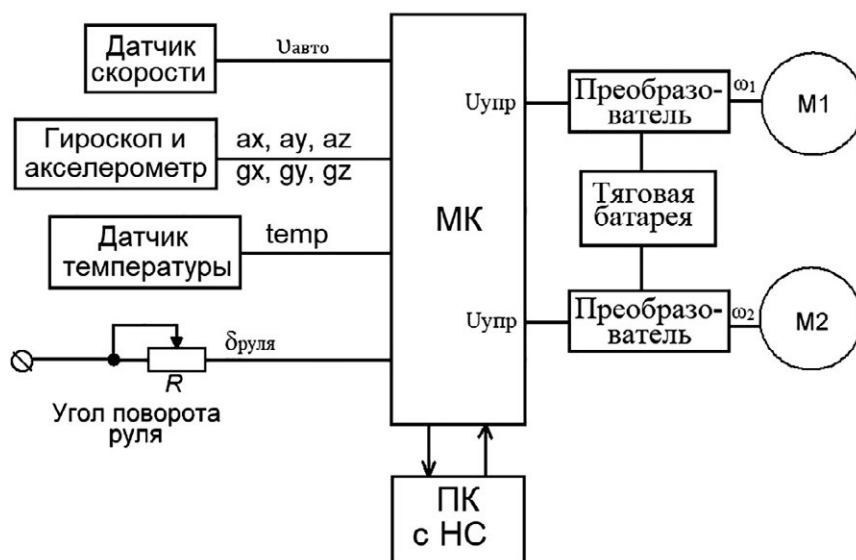


Рис. 1. Функциональная схема СЭД, основанной на НС (составлено авторами)

Fig. 1. Functional diagram of the ECM based on the NS

1. ПУТИ РАЗВИТИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

1.1. Самообучение разработанной модели СЭД на основе НС

Самообучающаяся электронная дифференциальная система (СЭД) – это важное направление в разработке интеллектуальных транспортных средств [5], способное повысить эффективность и безопасность

электроавтомобилей. СЭД адаптируется к условиям, учитывая погодные факторы (метель, туман, ураганные условия), привычки водителя и особенности дорожного покрытия, что позволяет оптимизировать управление транспортом и предотвращать пробуксовку в сложных ситуациях, например, при гололеде. В основе работы системы лежат алгоритмы обучения с подкреплением и поведенческого клонирования, которые позволяют накапливать и использовать данные для дальнейшей адаптации, подстраивая скорость и сцепление с дорогой в зависимости от текущих условий [6, 7].

1.2. Использование одного инвертора для независимого управления двумя двигателями

Одной из ключевых проблем при использовании двух независимых электродвигателей для системы электронного дифференциала является необходимость применения двух инверторов для их отдельного управления. Это требование усложняет конструкцию, увеличивает ее стоимость и снижает общую эффективность системы. Однако известны исследования, предлагающие различные подходы к решению данной проблемы, позволяющие использовать один инвертор для независимого управления двумя электродвигателями (Рис. 2).

Для устранения необходимости использования двух инверторов были предложены несколько новых топологий инверторов и схем управления [8–10]. Среди наиболее перспективных решений можно выделить пятивыводной инвертор [10] и инвертор с девятью силовыми ключами [11], которые способны независимо управлять двумя синхронными двигателями с постоянными магнитами (PMSM), что подтверждено исследованиями [8–10].

Более подробное математическое описание работы пятивыводного инвертора и его схемы управления представлено в статье [12]. Инвертор с девятью силовыми ключами (Рис. 3) также представляет собой альтернативное решение, которое позволяет управлять двумя PMSM-двигателями независимо, но требует более сложного управления и дополнительных компонентов. Тем не менее, это решение остается актуальным в контексте высокомоментных приложений, где критически важны точность и скорость управления.

Кроме вышеописанных пятивыводного и девятиключевого инвертора, существуют и другие топологии. В статье [13] описана схема

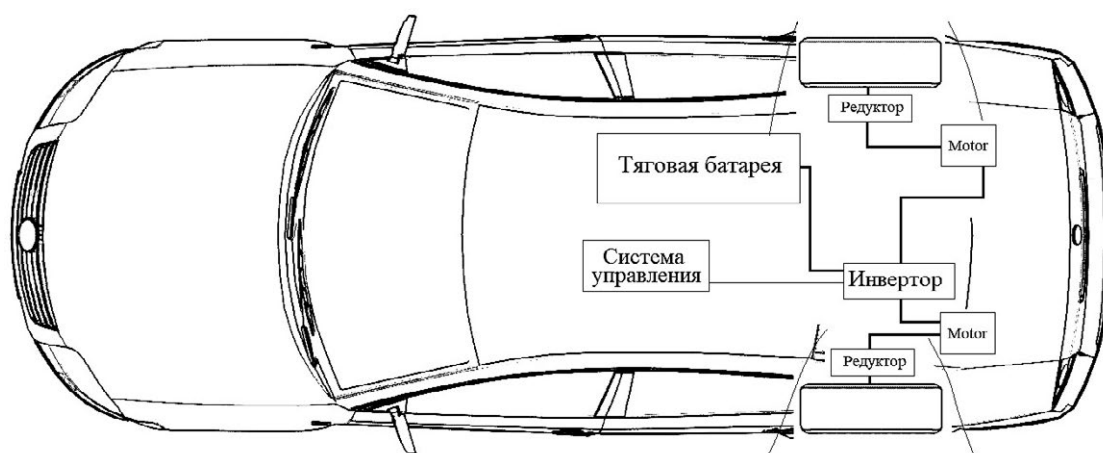


Рис. 2. Улучшенная реализация силовой части тягового электропривода электромобиля с приводом на задние колеса (составлено авторами)

Fig. 2. Improved implementation of the power section of the traction electric drive of a rear-wheel drive electric vehicle

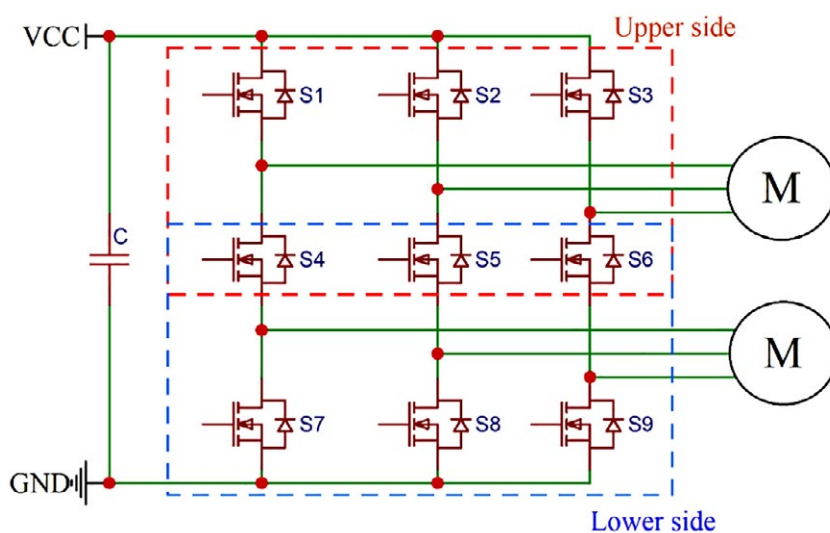


Рис. 3. Конфигурация схемы инвертора с девятью силовыми ключами (составлено авторами)

Fig. 3. Configuration of the inverter circuit with nine switch keys

управления с использованием шести силовых ключей, аналогичная инвертору обычного исполнения. Тем не менее, результаты испытаний показали, что предложенная конфигурация с шестью ключами имеет ряд недостатков. В частности, наблюдались значительные пульсации выходного тока, что напрямую влияет на выходной момент и стабильность работы системы. Эти пульсации могут стать критическим ограничением

для применения данной схемы в тяговых электроприводах электромобилей, где необходимы высокая точность и стабильность момента на валу двигателя.

Таким образом, для систем тягового электропривода, используемых в электромобилях, целесообразнее применять более сложные схемы инверторов, такие как топологии с 12 или 9 силовыми ключами. Эти схемы обеспечивают более высокое качество выходного момента и лучший КПД.

1.3. Реализация полноприводного автомобиля с четырьмя электродвигателями

Реализация полноприводного автомобиля с четырьмя электродвигателями, по одному на каждое колесо (Рис. 4), является перспективным направлением для применения в беспилотных транспортных средствах, автомобилях класса люкс, а также внедорожных решений. Данный подход, обладает значительным потенциалом для повышения управляемости и эффективности движения в сложных условиях эксплуатации.

Разработанную систему электронного дифференциала, основанного на искусственных нейронных сетях, можно адаптировать для управления таким полноприводным транспортным средством. Для этого требуется интеграция двух дополнительных тяговых приводов на переднюю ось автомобиля, а также внесение изменений в программное обеспечение системы управления электродвигателями. Основные изменения касаются увеличения количества контролируемых параметров, включая дополнительные замеры для передних приводов, а также расширение функционала для управления четырьмя приводами вместо двух.

Для эффективной адаптации системы потребуется также модификация программного обеспечения (ПО), предназначенного для обучения нейронной сети, с учетом новых входных и выходных сигналов, а также обновление принципиальной схемы модели электромобиля. Обновленная функциональная схема электромобиля представлена на Рис. 4, где обозначены основные элементы, включая цифровые входы (DI) и цифровые выходы (DO).

Реализация управления четырьмя электродвигателями может потребовать использования более производительного контроллера для обеспечения стабильной работы системы. В качестве возможных решений

можно рассматривать контроллеры серии STM32 или ESP32, которые обладают достаточной вычислительной мощностью и возможностями для эффективного управления многоприводной системой.

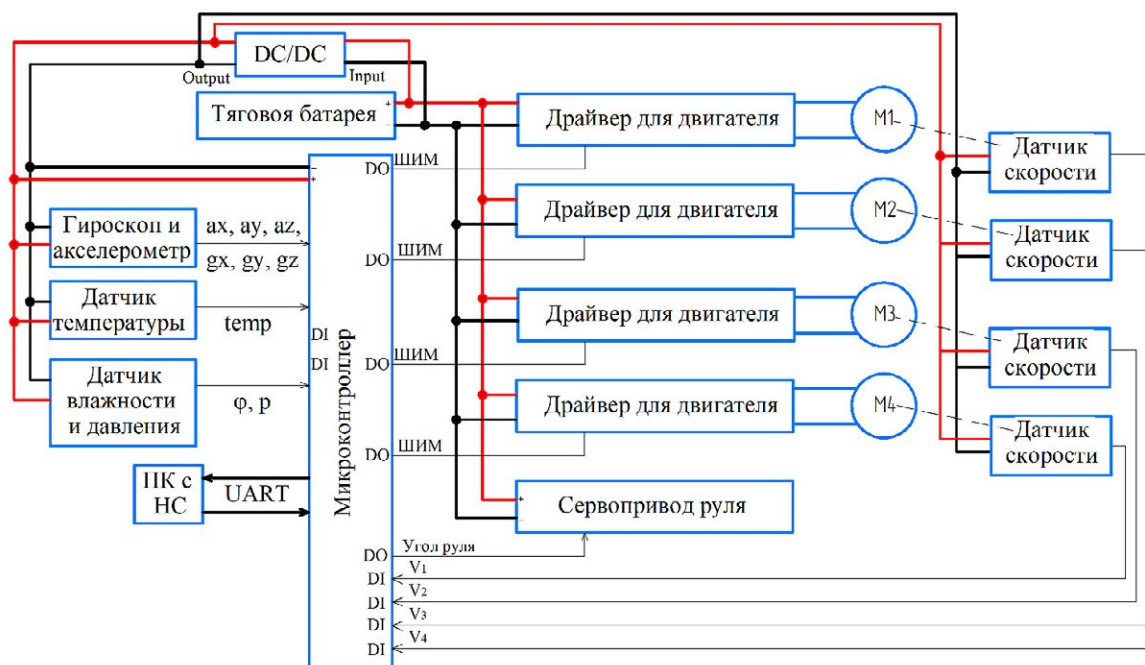


Рис. 4. Функциональная схема электронного дифференциала для четырех двигательной модели электромобиля (составлено авторами)

Fig. 4. Functional diagram of the electronic differential for a 4-motor electric vehicle model

1.4. Повышение адаптивности системы электронного дифференциала на основе нейронных сетей за счет интеграции дополнительных сенсоров

Разработанная система электронного дифференциала на базе нейронных сетей продемонстрировала свою эффективность и работоспособность. Для дальнейшего повышения ее адаптивности к изменяющимся дорожным условиям и обеспечению большей безопасности эксплуатации целесообразно ввести дополнительные датчики, такие как датчики освещенности, ультразвуковые и инфракрасные сенсоры

Датчик освещенности позволит системе автоматически определять время суток, а в сочетании с датчиком влажности – фиксировать наличие плохой видимости, вызванной, например, туманом или другими неблагоприятными погодными условиями. Эта информация может

использоваться для регулировки скорости и поведения транспортного средства в зависимости от видимости на дороге.

Ультразвуковой датчик будет предназначен для определения расстояния до впереди движущихся объектов, таких как автомобили или мотоциклы. В зависимости от дистанции система сможет корректировать скорость электропривода, что позволит избежать аварийных ситуаций, связанных с внезапными торможениями или пересечением встречной полосы.

Инфракрасный сенсор обеспечит распознавание «живых» объектов, таких как пешеходы или животные, и внесет вклад в предотвращение аварий, регулируя скорость транспортного средства в зависимости от близости таких объектов.

Для эффективного обучения нейронной сети необходимо создать соответствующие тренировочные условия, имитирующие реальные дорожные сценарии. Это может включать в себя создание тренировочных трасс с разделительными ограждениями, симуляцию трафика и расстановку препятствий. В качестве примеров обучения нейронной сети можно использовать не только регистрацию отклонений от маршрута, но и введение штрафов за столкновения, которые могут регистрироваться при помощи акселерометра. Обратная связь нейронной сети может осуществляться на основе функции максимизации, например, при помощи алгоритма Minmax [14, 15].

1.5. Упрощение процесса сбора данных для обучения нейронной сети электронного дифференциала при использовании компьютерного зрения

Для упрощения процесса сбора данных, необходимых для обучения нейронной сети системы электронного дифференциала электромобиля, можно использовать камеру, лазер и компьютер. Основной принцип заключается в установке камеры позади модели (или реального автомобиля), которая фиксирует пройденный путь (Рис. 5), а лазер используется в качестве устройства для разметки траектории движения. Для обеспечения качества съемки и точности данных необходима стабилизация камеры, которая предотвратит искажения изображения, вызванные тряской.

Процесс обучения нейронной сети сохраняет общие принципы, предложенные в данной работе. Ключевым элементом остается вычисление отклонения реальной траектории от эталонной, что изображено на Рис. 6 и представлено в работах [1, 2]. Однако использование камеры открывает

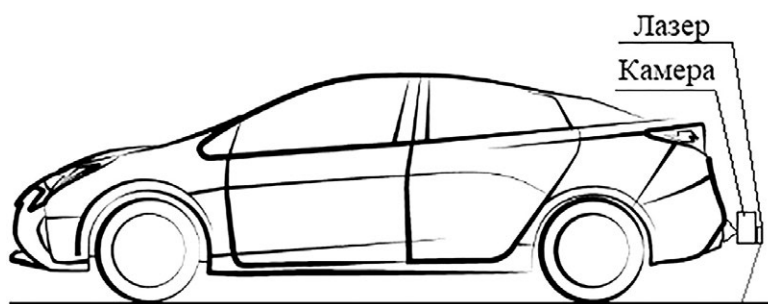


Рис. 5. Расположение камеры для съемки траектории движения автомобиля
(составлено авторами)

Fig. 5. Camera position for filming the vehicle's trajectory

дополнительные возможности для более сложного и устойчивого обучения, в частности, теперь система может анализировать не отдельные повороты, а цепочки поворотов, плавно переходящих друг в друга.

Расчет отклонений может быть произведен на этапе постобработки данных с помощью перевода изображения из пиксельного формата в координаты. Этот процесс также может быть автоматизирован с использованием методов компьютерного зрения, таких как показано в исследованиях [16, 17].

1.6. Интеграция СЭД в антиблокировочную систему автомобиля

Интеграция ABS с системой электронного дифференциала на основе нейронных сетей открывает перспективы для более точного и адаптивного управления автомобилем в реальном времени. Использование ИНС в таких системах позволит анализировать множество входных данных, включая параметры торможения, скорость вращения колес, поведение транспортного средства в поворотах и дорожные условия. Это приведет к созданию более интеллектуальных систем управления, которые способны адаптироваться к изменяющимся ситуациям и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций.

Структура ABS включает в себя несколько ключевых компонентов. Во-первых, система измеряет скорость вращения колес с помощью датчиков. Во-вторых, ABS генерирует выходные дискретные сигналы, которые управляют гидравлическими клапанами тормозного привода.

Эти сигналы можно интегрировать в структуру электронного дифференциала, что позволит осуществлять более точное управление

тормозными механизмами в зависимости от ситуации на дороге. Например, в случае интенсивного торможения система СЭД сможет учитывать работу ABS для оптимального перераспределения тормозных усилий между колесами.

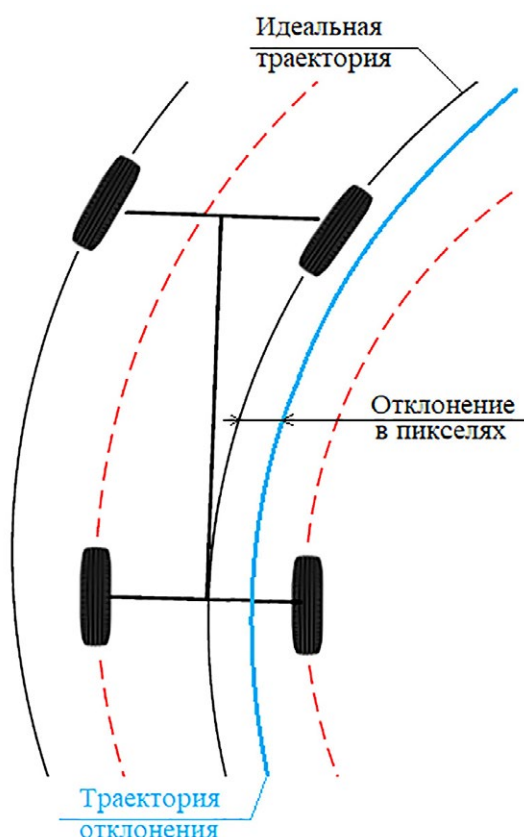


Рис. 6. Иллюстрация отклонения от идеальной траектории для его автоматического вычисления (составлено авторами)

Fig. 6. Illustration of deviation from the ideal trajectory for it's automatic calculation

Дополнение системы электронного дифференциала на основе НС, в контексте интеграции с ABS, можно представить в виде функциональной схемы, показанной на Рис. 7. В этой схеме условно обозначены переднее левое (FL), переднее правое (FR), заднее левое (RL) и заднее правое (RR) колеса. В блок электронного дифференциала поступают данные о скорости вращения колес, а также сигналы от блока управления ABS для активации или деактивации клапанов гидравлической системы тормозов. В случае активации ABS, тяговый двигатель может быть автоматически отключен, что позволяет системе оптимизировать процессы торможения и стабилизации автомобиля.

Более того, если система получает положительный сигнал с датчика педали тормоза и при этом на колесах FL, FR, RL, RR отсутствуют сигналы о высокой скорости вращения, двигатель может быть переведен в режим противовключения. Это позволит сократить тормозной путь за счет использования тягового двигателя для дополнительного замедления транспортного средства, что особенно важно в условиях экстренного торможения на скользких или мокрых поверхностях.

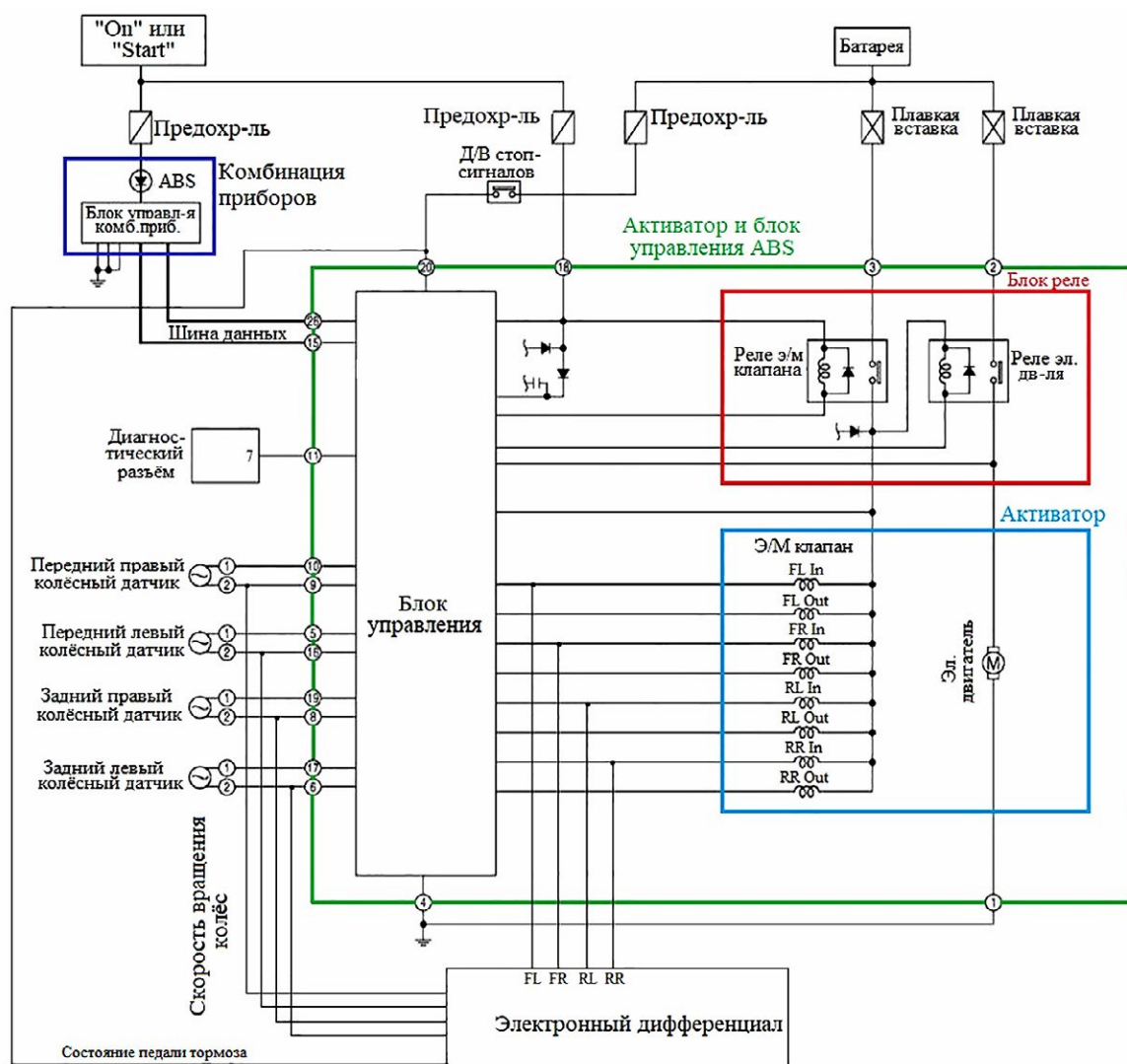


Рис. 7. Функциональная схема дополнения ABS системой электронного дифференциала (составлено авторами)

Fig. 7. Functional diagram of the addition of an electronic differential system to ABS

1.7. Адаптация модели НС для работы с маломощными вычислительными устройствами

Разработанная в данной работе система электронного дифференциала требует наличие значительных вычислительных мощностей, однако этот недостаток может быть компенсирован при помощи нескольких техник.

1. Квантизация. Квантизация уменьшает разрядность чисел, используемых для представления весов и активаций модели. Обычно модели обучаются с весами и активациями в формате 32-битных чисел с плавающей точкой (FP32). Квантизация переводит их в 8-битные целые числа (INT8), что значительно снижает объем памяти и ускоряет вычисления [18, 19]. Это полезно на мобильных устройствах или микроконтроллерах, где ресурсы ограничены. Варианты реализации:

- Пост-тренировочная квантизация (Post-Training Quantization): модель обучается в FP32, а затем квантизируется.
- Квантизация с дообучением (Quantization Aware Training): модель обучается с учетом предстоящей квантизации, что позволяет сохранить более высокую точность.

2. Прореживание весов (Pruning). Прореживание заключается в удалении малозначимых весов из модели. Например, веса с малыми значениями, которые мало влияют на предсказания, могут быть обнулены, что уменьшает количество вычислений и использование памяти [20, 21]. Существует несколько видов прореживания:

- Универсальное (Global Pruning): удаляются веса с наименьшей важностью по всей модели.
- Структурное прореживание и упрощение архитектуры (Structured Pruning): удаляются целые нейроны или фильтры, что упрощает архитектуру модели.

3. Сжатие модели (Model Compression). Сжатие модели достигается за счет применения техник таких, как [22, 23]:

- Кодирование весов (Weight Sharing) – веса моделей могут быть закодированы, используя меньше памяти, например, через квантизацию или использование подходов, основанных на кластеризации.
- Сжатие с помощью алгоритмов, таких как SV – разложение весов через метод сингулярных разложений (SVD), что позволяет уменьшить количество параметров.

4. Трансформация архитектуры (Model Architecture Transformation). Это процесс упрощения структуры модели за счет

использования более легковесных архитектур [24, 25], таких как: MobileNet, SqueezeNet, ShuffleNet. Они разработаны для работы на устройствах с ограниченными ресурсами. Эти архитектуры используют эффективные операции, такие как глубинные свертки (Depthwise Separable Convolutions) и группы сверток (Grouped Convolutions), что снижает объем вычислений без потери производительности.

5. Использование специальных библиотек и фреймворков. Такие библиотеки, как TensorFlow Lite, ONNX Runtime, TFLite Micro и PyTorch Mobile, оптимизируют модели для работы на устройствах с ограниченными ресурсами. Эти фреймворки поддерживают квантизацию, принаряжение и прочие методы оптимизации.

6. Факторизация матриц (Matrix decomposition). Большие матрицы весов можно разложить на произведение меньших матриц (например, через сингулярное разложение, SVD). Это снижает объем операций умножения и сложения при передаче данных через слои [26, 27].

7. Использование аппаратных оптимизаций. Некоторые устройства (например, смартфоны с нейронными процессорами) поддерживают аппаратные ускорители для нейронных сетей [28], что позволяет эффективнее исполнять модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самообучающаяся электронная дифференциальная система представляет собой перспективное направление в развитии интеллектуальных транспортных средств, способное значительно повысить эффективность и безопасность электроавтомобилей.

Существующая конфигурация электропривода, требующая использования двух инверторов для независимого управления тяговыми электродвигателями, может быть оптимизирована с применением инверторных топологий, содержащих 9 или 12 силовых ключей. Это позволит использовать только один инвертор вместо двух, что приведет к повышению эффективности системы (КПД).

Разработанную систему электронного дифференциала на основе искусственных нейронных сетей можно адаптировать для управления полноприводным транспортным средством.

Процесс получения данных для обучения нейронной сети электронного дифференциала электромобиля может быть автоматизирован с использованием камеры, лазера и компьютера.

Интеграция системы ABS с электронным дифференциалом на основе нейронных сетей создает перспективы для более точного и адаптивного управления автомобилем в реальном времени.

Оптимизация работы нейронной сети для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами возможна за счет применения методов квантования, сжатия модели, нормализации весов, трансформации архитектуры с использованием специализированных библиотек и фреймворков, а также факторизации матриц и аппаратных оптимизаций.

Авторы заявляет, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены;
3. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors states that:

1. They have no conflict of interest;
2. All applicable international, national and/or institutional guidelines for the care and use of animals have been followed;
3. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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
2. Lisov A.A., Panishev S.A., Gundarev K.A. Development of an Electronic Differential System Based on Artificial Neural Networks for Electric Transport. In: 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2024 P. 192–196. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718938
3. Yildirim M., Kurum H. Electronic differential system for an electric vehicle with four in-wheel PMSM // Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). 2020. P. 1–5. doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129139
4. Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Лисов А.А., Илимбетов Р. Ю. Разработка и моделирование пропорционально-интегрального регулятора для электронного дифференциала электротрактора сельскохозяйственного назначения // Вестник Башкирского Государственного Аграрного Университета. 2022. Т. 2, № 62. С. 119–124. doi: 10.31563/1684-7628-2022-62-2-119-124
5. Rigas E.S., Ramchurn S.D., Bassiliades N. Managing electric vehicles in the smart grid using artificial intelligence: A survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2014. Vol. 16(4). P. 1619–1635. doi: 10.1109/TITS.2014.2376873

6. Nguyen D.H., Widrow B. Neural networks for self-learning control systems // *IEEE Control Systems Magazine*. 2002. Vol. 10(3). P. 18–23. doi: 10.1109/37.55119
7. Li S. E. Deep reinforcement learning. In: *Reinforcement Learning for Sequential Decision and Optimal Control*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2023. P. 365–402. doi: 10.1007/978-981-19-7784-8_10
8. Hizume M. Independent vector control of parallel-connected two induction motors by a five-leg inverter. In: *Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2003. Vol. 778.
9. Nozawa Y. Independent position control of two permanent magnet synchronous motors with five-leg inverter by the expanded two arm modulation method // *JIASC*. 2005. Vol. 79.
10. Oka K. Improved method of voltage transfer ratio for five-leg inverter. // *JIASC2005*. 2005. Vol. 75.
11. Gulbudak O, Gokdag M. Dual-hysteresis band control of nine-switch inverter to control two induction motors // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021. Vol. 37(2). P. 788–99. doi: 10.1109/TEC.2021.3131385
12. Krishnakumar V, Kamaraj V, Perianayagam C.A. An integrated drive for two PMSMs involved automotive applications and development of current reference expanded two arm modulation technique // *Circuits and Systems*. 2016. Vol. 7(08). P. 1794–1799. doi: 10.4236/cs.2016.78155
13. Pao Y.H., Phillips S.M. The functional link net and learning optimal control // *Neurocomputing*. 1995. Vol. 9. P.149–164. doi: 10.1016/0925-2312(95)00066-F
14. Radunovic B., Le Boudec J.Y. A unified framework for max-min and min-max fairness with applications // *IEEE/ACM Transactions on networking*. 2007. Vol. 15(5). P. 1073–1083. doi: 10.1109/TNET.2007.896231
15. Razaviyayn M., Huang T., Lu S., et al. Nonconvex min-max optimization: Applications, challenges, and recent theoretical advances // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. Vol. 37(5). P. 55–66. doi: 10.1109/MSP.2020.3003851
16. Kim N., Bae J., Kim C., et al. Object distance estimation using a single image taken from a moving rolling shutter camera // *Sensors*. 2020 Vol. 20(14). P. 3860–3870. doi: 10.3390/s20143860
17. Zhu W., Anderson B., Zhu S., Wang YA. computer vision-based system for stride length estimation using a mobile phone camera. In: *18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. 2016. P. 121–130. doi: 10.1145/2982142.298215
18. Gholami A., Kim S., Dong Z., Yao Z., Mahoney M.W., Keutzer K. A survey of quantization methods for efficient neural network inference // *Low-Power Computer Vision*. 2022. P. 291–326.
19. Guo Y. A survey on methods and theories of quantized neural networks // *arXiv preprint arXiv:1808.04752*. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1808.04752
20. Blalock D., Gonzalez Ortiz J.J., Frankle J., Gutttag J. What is the state of neural network pruning? // *Proceedings of machine learning and systems*. 2020. Vol. 2. P. 129–146.

21. Cheng H., Zhang M., Shi J.Q. A survey on deep neural network pruning: Taxonomy, comparison, analysis, and recommendations // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2024. doi: 10.1109/TPAMI.2024.3447085
22. Cheng Y., Wang D., Zhou P., Zhang T. Model compression and acceleration for deep neural networks: The principles, progress, and challenges // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2018. Vol. 35(1). P. 126–36. doi: 10.1109/MSP.2017.2765695
23. Deng L., Li G., Han S., Shi L., Xie Y. Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey // *Proceedings of the IEEE*. 2020. Vol. 108(4). P. 485–532. doi: 10.1109/JPROC.2020.2976475
24. Burgueno L., Cabot J., Li S., Gérard S. A generic LSTM neural network architecture to infer heterogeneous model transformations // *Software and Systems Modeling*. 2022. Vol. 21(1). P. 139–156. doi: 10.1007/s10270-021-00893-y
25. Burgueno L., Cabot J., Li S., Gérard S. An LSTM-based neural network architecture for model transformations. In: *ACM/IEEE 22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*. 2019 P. 294–299. doi: 10.1016/j.cola.2022.101174
26. Bulat A., Kossaifi J., Tzimiropoulos G., Pantic M. Matrix and tensor decompositions for training binary neural networks // *arXiv preprint arXiv:1904.07852*. 2019. doi: 10.48550/arXiv.1904.07852
27. Chen S., Zhou J., Sun W., Huang L. Joint matrix decomposition for deep convolutional neural networks compression // *Neurocomputing*. 2023. Vol. 516. P. 11–26. doi: 10.1016/j.neucom.2022.10.021
28. Capra M., Bussolino B., Marchisio A., et al. Hardware and software optimizations for accelerating deep neural networks: Survey of current trends, challenges, and the road ahead // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 225134–225180. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039858

REFERENCES

1. 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. (in Russ.) doi: 10.17816/transsyst634127
2. Lisov AA, Panishev SA, Gundarev KA. Development of an Electronic Differential System Based on Artificial Neural Networks for Electric Transport. In: *2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2024;192–196. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718938
3. Yildirim M, Kurum H. Electronic differential system for an electric vehicle with four in-wheel PMSM. In: *Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. 2020;1–5. doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129139
4. Vozmilov AG, Urmanov VG, Lisov AA, Ilimbetov RYu. Development and simulation of the proportional and integral regulator for the electronic differential of an electric farm tractor. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2022;2(62):119–124 (In Russ.). doi: 10.31563/1684-7628-2022-62-2-119-124

5. Rigas ES, Ramchurn SD, Bassiliades N. Managing electric vehicles in the smart grid using artificial intelligence: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014;16(4):1619–1635. doi: 10.1109/TITS.2014.2376873
6. Nguyen DH, Widrow B. Neural networks for self-learning control systems. *IEEE Control Systems Magazine*. 2002;10(3):18–23. DOI: 10.1109/37.55119
7. Li SE. Deep reinforcement learning. In: *Reinforcement Learning for Sequential Decision and Optimal Control*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2023:365–402. doi: 10.1007/978-981-19-7784-8_10
8. Hizume M. Independent vector control of parallel-connected two induction motors by a five-leg inverter. In: *Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2003;778.
9. Nozawa Y. Independent position control of two permanent magnet synchronous motors with five-leg inverter by the expanded two arm modulation method. *JIASC*. 2005;79.
10. Oka K. Improved method of voltage transfer ratio for five-leg inverter. *JIASC2005*. 2005;75.
11. Gulbudak O, Gokdag M. Dual-hysteresis band control of nine-switch inverter to control two induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021;37(2):788–99. doi: 10.1109/TEC.2021.3131385
12. Krishnakumar V, Kamaraj V, Perianayagam CA. An integrated drive for two PMSMs involved automotive applications and development of current reference expanded two arm modulation technique. *Circuits and Systems*. 2016;7(08):1794–1799. doi: 10.4236/cs.2016.78155
13. Pao YH, Phillips SM. The functional link net and learning optimal control. *Neurocomputing*. 1995;9:149–164. doi: 10.1016/0925-2312(95)00066-F
14. Radunovic B, Le Boudec JY. A unified framework for max-min and min-max fairness with applications. *IEEE/ACM Transactions on networking*. 2007;15(5):1073–1083. doi: 10.1109/TNET.2007.896231
15. Razaviyayn M, Huang T, Lu S, Nouiehed M, Sanjabi M, Hong M. Nonconvex min-max optimization: Applications, challenges, and recent theoretical advances. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020;37(5):55–66. doi: 10.1109/MSP.2020.3003851
16. Kim N, Bae J, Kim C, et al. Object distance estimation using a single image taken from a moving rolling shutter camera. *Sensors*. 2020;20(14):3860–3870. doi: 10.3390/s20143860
17. Zhu W, Anderson B, Zhu S, Wang YA. computer vision-based system for stride length estimation using a mobile phone camera. In: *18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. 2016:121–130. doi: 10.1145/2982142.298215
18. Gholami A, Kim S, Dong Z, et al. A survey of quantization methods for efficient neural network inference. *Low-Power Computer Vision*. 2022:291–326.
19. Guo Y. A survey on methods and theories of quantized neural networks. *arXiv preprint arXiv:1808.04752*. 2018. doi: 10.48550/arXiv.1808.04752
20. Blalock D, Gonzalez Ortiz JJ, Frankle J, Gutttag J. What is the state of neural network pruning? *Proceedings of machine learning and systems*. 2020;2:129–146.

21. Cheng H, Zhang M, Shi JQ. A survey on deep neural network pruning: Taxonomy, comparison, analysis, and recommendations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2024. doi: 10.1109/TPAMI.2024.3447085
22. Cheng Y, Wang D, Zhou P, Zhang T. Model compression and acceleration for deep neural networks: The principles, progress, and challenges. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2018;35(1):126–36. doi: 10.1109/MSP.2017.2765695
23. Deng L, Li G, Han S, et al. Model compression and hardware acceleration for neural networks: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*. 2020;108(4):485–532. doi: 10.1109/JPROC.2020.2976475
24. Burgueno L, Cabot J, Li S, Gérard S. A generic LSTM neural network architecture to infer heterogeneous model transformations. *Software and Systems Modeling*. 2022;21(1):139–156. doi: 10.1007/s10270-021-00893-y
25. Burgueno L, Cabot J, Li S, Gérard S. An LSTM-based neural network architecture for model transformations. *ACM/IEEE 22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*. 2019:294–299. doi: 10.1016/j.cola.2022.101174
26. Bulat A, Kossaifi J, Tzimiropoulos G, Pantic M. Matrix and tensor decompositions for training binary neural networks. *arXiv preprint arXiv:1904.07852*. 2019. doi: 10.48550/arXiv.1904.07852
27. Chen S, Zhou J, Sun W, Huang L. Joint matrix decomposition for deep convolutional neural networks compression. *Neurocomputing*. 2023;516:11–26. doi: 10.1016/j.neucom.2022.10.021
28. Capra M, Bussolino B, Marchisio A, et al. Hardware and software optimizations for accelerating deep neural networks: Survey of current trends, challenges, and the road ahead. *IEEE Access*. 2020;8:225134–225180. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039858

Сведения об авторах:

Лисов Андрей Анатольевич, аспирант;

eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Возмилов Александр Григорьевич, профессор, д.т.н.;

eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;

E-mail: vozmiag@rambler.ru

Information about the authors:

Andrey A. Lisov, postgraduate student;

eLibrary SPIN: 1956-3662; ORCID: 0000-0001-7282-8470;

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Alexander G. Vozmilov, Professor, Doctor of Technical Sciences;

eLibrary SPIN: 2893-8730; ORCID: 0000-0002-1292-3975;

E-mail: vozmiag@rambler.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst660871>

© И.В. Мартиросян, Д.А. Александров, С.В. Покровский

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(Москва, Россия)

МАГНИТНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ВТСП ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ НЕЗАМКНУТЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБМОТОК

Цель. Сравнение магнитных и транспортных характеристик рейстрек-катушек и незамкнутых ВТСП обмоток.

Методы. Численный анализ выполнен методом конечных элементов в среде моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. Для этих геометрий, характерных в электромагнитных системах ВТСП генератора, выполнен расчет распределений токов, магнитных полей и температур в условиях воздействия постоянного транспортного тока, а также выполнен расчет потерь на переменном токе при различных амплитудах и частотах токовой нагрузки в условиях охлаждения жидким азотом.

Закключение. В условиях охлаждения жидким азотом рейстрек-катушки обладают лучшими магнитными и транспортными характеристиками в сравнении с незамкнутыми кольцевыми ВТСП обмотками, на что решающее влияние оказывает их геометрический фактор. Наиболее выгодной конфигурацией обмотки элементов ВТСП генератора при азотном охлаждении является рейстрек-катушка.

Ключевые слова: незамкнутые сверхпроводящие обмотки; композитные ВТСП-ленты; FEM-моделирование; А-Т-формализм.

Как цитировать:

Мартиросян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В. Магнитные и транспортные характеристики элементов ВТСП генератора на основе незамкнутых сверхпроводящих обмоток // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 43–59. doi: 10.17816/transsyst660871

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, D. A. Aleksandrov, S.V. Pokrovskii

National research nuclear university MEPhI

(Moscow, Russia)

**MAGNETIC AND TRANSPORT CHARACTERISTICS
OF ELEMENTS OF HTS GENERATOR BASED ON OPEN-LOOP
SUPERCONDUCTING COILS**

Aim. Comparison of magnetic and transport characteristics of racetrack model coils and open-loop HTS coils.

Methods. Numerical analysis was performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics simulation environment.

Results. For these configurations, typical in electromagnetic systems of a HTS generator, the distribution of currents, magnetic fields, and temperatures under the influence of direct transport current were calculated, and losses in alternating current at different amplitudes and frequencies of the current load under liquid nitrogen cooling were calculated.

Conclusion. Under liquid nitrogen cooling, racetrack model coils have better magnetic and transport characteristics compared to open-loop HTS coils, due to their configuration which has a dominant impact. The most advantageous configuration of the coil of the elements of the HTS generator with nitrogen cooling is a racetrack model coil.

Keywords: open-loop superconducting coils; composite HTS-ribbons; FEM simulation; A-T-formalism.

To cite this article:

Martirosian IV, Aleksandrov DA, Pokrovskii SV. Magnetic and transport characteristics of elements of HTS generator based on open-loop superconducting coils. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):43–59. doi:10.17816/transsyst660871

ВВЕДЕНИЕ

Вращающиеся машины, в конструкции которых используются высокотемпературные сверхпроводящие ленты, обладают существенными преимуществами в сравнении с устройствами на основе традиционных сверхпроводящих материалов, а именно значительно большей удельной мощностью, меньшим весом, компактными размерами и более высокой эффективностью [1–3]. В настоящий момент сверхпроводниковые генераторы активно применяются в энергетическом секторе [4, 5], при разработке и изготовлении силовых установок для морских судов [6, 7] и в авиационной промышленности [8, 9]. В качестве ВТСП элементов таких генераторов до недавнего времени зачастую выступали ВТСП композиции, представленные в виде объемной ВТСП керамики или стопок композитных ВТСП лент. Основным недостатком объемных ВТСП элементов для применения во вращающихся машинах является их хрупкость. Размеры элементов на основе стопок ВТСП лент, в свою очередь, ограничены в силу особенностей производства промышленных лент, что является существенной помехой для изготовления магнитов захваченного потока применительно к ВТСП машинам.

Наибольшее распространение в конструкциях генераторов на основе ВТСП лент получили панкейк- и рейстрек-катушки, которые демонстрируют высокую надежность и эффективность [10, 11]. Кроме того, ведутся разработка и реализация проектов, в которых применяются аркообразные катушки, способные обеспечить более равномерное распределение магнитного поля [12]. В последнее время также получили распространение устройства для накачки магнитного потока (flux pump devices), которые позволяют создавать и поддерживать магнитный поток без значительных внешних затрат энергии [13, 14]. В совокупности указанные технологии не только расширяют функциональные возможности ВТСП генераторов, но и способствуют их внедрению в новые области, включая высокоскоростной транспорт, системы возобновляемой энергетики и даже перспективные исследования в области термоядерного синтеза. Несмотря на активное использование ВТСП технологий в современных вращающихся машинах, вопрос выбора наиболее эффективной конструкции катушек для реализации маломасштабного прототипа остается недостаточно изученным.

Настоящая работа посвящена экспериментальным и численным исследованиям, направленным на анализ магнитных и транспортных характеристик наиболее перспективных ВТСП элементов генератора:

рейстречковых ВТСП катушек и незамкнутых кольцевых ВТСП обмоток. В рамках проведенного численного анализа получены распределения токов, магнитного поля, температур и потерь для рассматриваемых элементов ВТСП генератора. Экспериментально и численно исследовались потери на переменном токе для ВТСП обмоток, охлаждаемых жидким азотом, при различных амплитудах и частотах переменного транспортного тока. На основе результатов проведенных исследований делается вывод о перспективности применения рейстрек-катушек и незамкнутых кольцевых обмоток для реализации маломасштабного ВТСП генератора. Полученные результаты будут также использованы для разработки и оптимизации вращающихся машин на основе ВТСП элементов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

В качестве основного токопроводящего материала для реализации сверхпроводящего генератора выбран ленточный высокотемпературный сверхпроводящий композит на основе соединения типа $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (REBCO, где RE – редкоземельный элемент) производства российской компании С-Инновации. REBCO в виде композитных ВТСП лент обладает высокими прочностными характеристиками, хорошей теплопроводностью, а главное – высокими магнитными и токонесущими характеристиками. В общем случае композитная ВТСП лента представляет собой металлическую ленту, с набором последовательно осажденных функциональных слоев. Толщина некоторых слоев составляет всего несколько нанометров. Наноразмерные слои выполняют различные функции (буферные, защитные, улучшение адгезии к подложке и т.д.), но не играют существенной роли в электродинамических и теплофизических процессах ввиду своей малой толщины, в связи с чем не представляют интереса в рамках математического моделирования и, как правило, не учитываются. Таким образом, в рамках численного моделирования каждая ВТСП лента имеет слоистую структуру, содержащую слои подложки (70 мкм), ВТСП слой (3 мкм), слой серебра (5 мкм), а также двусторонне медное покрытие (10 мкм с каждой стороны). Ширина ВТСП лент составляет 4 мм. Толщина h_{HTS} ВТСП лент REBCO производства С-Инновации, рассматриваемых в представленной работе, составляет 0,1 мм. Согласно спецификации производителя, средний критический ток ВТСП ленты составляет 120 А в собственном поле при температуре кипения жидкого азота. Следует отметить наличие реального разброса

в распределении критического тока вдоль лент, который оценивается на уровне не менее, чем 15%. Это означает, что фрагменты ленты даже из одной партии могут иметь различный критический ток. В связи с этим при моделировании с целью анализа потерь учитывается возможность фрагментарного варьирования критического тока ВТСП лент на 15%. Температура сверхпроводящего перехода для контрольных образцов была измерена экспериментально и составила ~ 92 К.

В рамках настоящей работы исследованы магнитные и транспортные характеристики двух типов ВТСП катушек: рейстрек-катушки и круговые обмотки. Принципиальная схема рейстрек-катушки представлена на Рис. 1. Рейстрек-катушка представляет из себя послойную спиралевидную намотку проводника на формер, содержащий два скругленных участка и два параллельных линейных участка. Длина прямого участка катушки L , внутренний радиус R_1 внешний радиус $R_2 = R_1 + n \cdot h$, где n – число витков обмотки, h – толщина одного слоя обмотки. Круговая ВТСП обмотка с математической точки зрения является идеальной спиралью Архимеда (Рис. 2). Длина L линейного участка рейстрек-катушки составляет 80 мм, малый радиус $R_1=20$ мм. Малый радиус кольцевой незамкнутой ВТСП обмотки $R_1=30$ мм. Количество n ВТСП слоев обмоток при моделировании варьируется от 1 до 40. Для проведения вычислений использовалась геометрия, дублирующая геометрию катушек, изготовленных для проведения экспериментальных исследований.

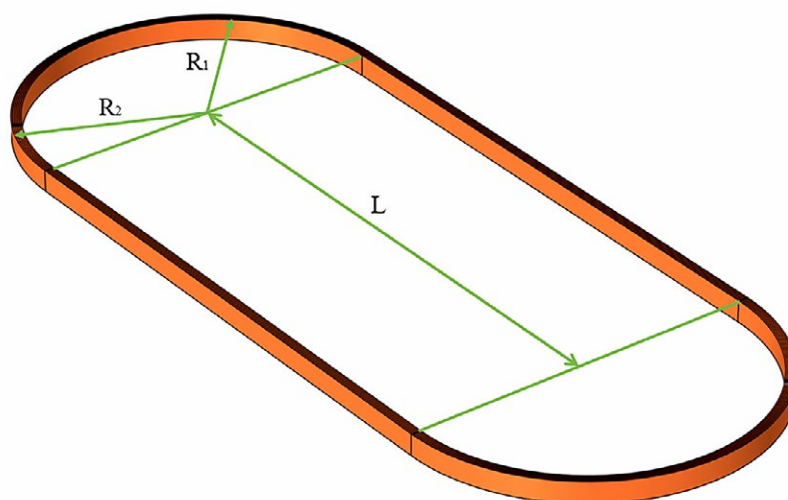


Рис. 1. Принципиальная схема рейстрек-катушки

Fig. 1. Schematic diagram of the racetrack coil

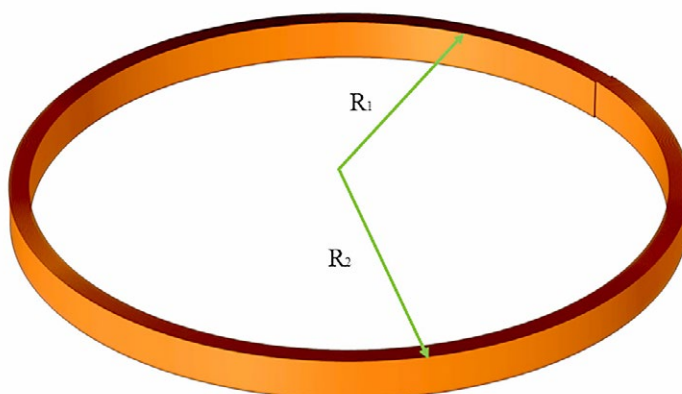


Рис. 2. Принципиальная схема круговой обмотки

Fig. 2. Schematic diagram of a circular winding

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Моделирование элементов сверхпроводящего генератора выполнялось в среде Comsol Multiphysics в А-Т формулировке нестационарных уравнений Максвелла. При решении задач в А-Т формулировке решатель использует две переменные состояния: компоненты токового векторного потенциала $\mathbf{T}$ и компоненты магнитного векторного потенциала $\mathbf{A}$.

Токовый потенциал применяется к сверхпроводящим областям для решения задачи о распределении плотности тока $\mathbf{J}$ в сверхпроводнике:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} = \nabla \times (T\mathbf{n}) \quad (1)$$

где $\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$ – вектор нормали. Тогда выражение (1) приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial(Tn_z)}{\partial y} - \frac{\partial(Tn_y)}{\partial z} \\ \frac{\partial(Tn_x)}{\partial z} - \frac{\partial(Tn_z)}{\partial x} \\ \frac{\partial(Tn_y)}{\partial x} - \frac{\partial(Tn_x)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Управляющее уравнение системы для сверхпроводящих доменов представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{J_c(B, T)} \right) = \nabla \times \left(E_0 \left(\frac{|\nabla \times \mathbf{T}|}{J_c(B, T)} \right)^n \frac{\nabla \times \mathbf{T}}{J_c(B, T)} \right) = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (3)$$

Где $\mathbf{E}$ – напряженность электрического поля, E_0 – критерий для критического электрического поля, равный 1 мкВ/см, $J_c(B, T)$ – величина критического тока ВТСП лент в магнитном поле B при локальной температуре T , n – показатель степени, равный для исследуемых образцов 27, $\mathbf{T}$ – токовый векторный потенциал, $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля.

Магнитный потенциал $\mathbf{A}$ выступает в качестве зависимой переменной во всем расчетном пространстве:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4)$$

μ – магнитная проницаемость.

Для определения величины тока I , протекающего через плоский сверхпроводник, используется граничное условие:

$$I = \iint_S \mathbf{J} dS = \iint_S \nabla \times \mathbf{T} dS = \oint_S \mathbf{T} dl \quad (5)$$

где S – поперечное сечение проводящего слоя, l – длина его периметра.

При использовании методов гомогенизации плотность тока сверхпроводящего домена J_s вычисляется как:

$$\mathbf{J}_s = \frac{\delta}{\Lambda} \mathbf{J} \quad (6)$$

где Λ – полная толщина ленты, δ – толщина ВТСП слоя.

Для получения сходимости задачи необходимо применить граничные условия Дирихле к боковым границам гомогенизированного домена, а к верхним и нижним границам – граничные условия Неймана.

В основе описания физики тепловых процессов заложено нестационарное уравнение теплопередачи в твердых телах:

$$\rho C_p \frac{\partial \tau}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla \tau) = Q + \rho C_p \mathbf{w} \nabla \tau, \quad (7)$$

где в качестве зависимой переменной выступает абсолютная температура τ , C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, w – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические. Подробное описание теплофизической модели при охлаждении жидким азотом представлено в работе [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитные и транспортные характеристики сверхпроводящих элементов генератора исследованы при амплитудах переменного транспортного тока амплитуды от 10% до 90% от величины критического тока J_c в диапазоне частот транспортного тока от 50 Гц до 1033 Гц.

На Рис. 3 представлены распределения магнитного поля незамкнутых ВТСП катушек с 40 слоями обмотки ($J_{c0}=120$ А) при протекании по ним постоянного транспортного тока амплитуды 85 А ($\sim 0,7 J_c$) в условиях охлаждения жидким азотом. Величина магнитного поля, индуцируемого такими катушками приблизительно одинакова (отличие $\sim 6,5\%$). Однако, важно отметить, что для кольцевой конфигурации характерна бóльшая напряженность магнитного поля в центре, что в процессе эксплуатации может привести к подавлению критического тока ВТСП композитов. Для проверки этого предположения были построены распределения индукции магнитного поля в центральном сечении каждой ВТСП катушки (Рис. 4).

В обоих случаях максимальное магнитное поле приходится на внутренние края обмоток, в случае рейстрек-катушки магнитное поле на скругленных участках кабеля выше, чем на прямых участках. Следует заметить, что величина максимального магнитного поля на обмотках для рейстрек-конфигурации почти на 10% ниже, чем для кольцевой, что может оказаться значимым, особенно при пониженных температурах.

Некоторые различия были также выявлены и в тепловом поведении этих двух видов обмоток. На Рис. 5 и 6 соответственно приведены распределения температур в центральном сечении и на поверхности для рейстрек-катушки и кольцевой обмотки, содержащих 40 слоев ВТСП ленты и охлаждаемых жидким азотом при пропускании транспортного тока величиной 85 А. В обоих случаях максимальному нагреву подвержены средние слои обмоток, контактирующие с хладагентом только с торцов и окруженные, к тому же, другими токонесущими греющимися ВТСП

лентами. Однако максимальный нагрев лент в рейстрек-катушке составил $\sim 0,6$ К, а ВТСП элементы кольцевой обмотки изменили температуру на 1,7 К.

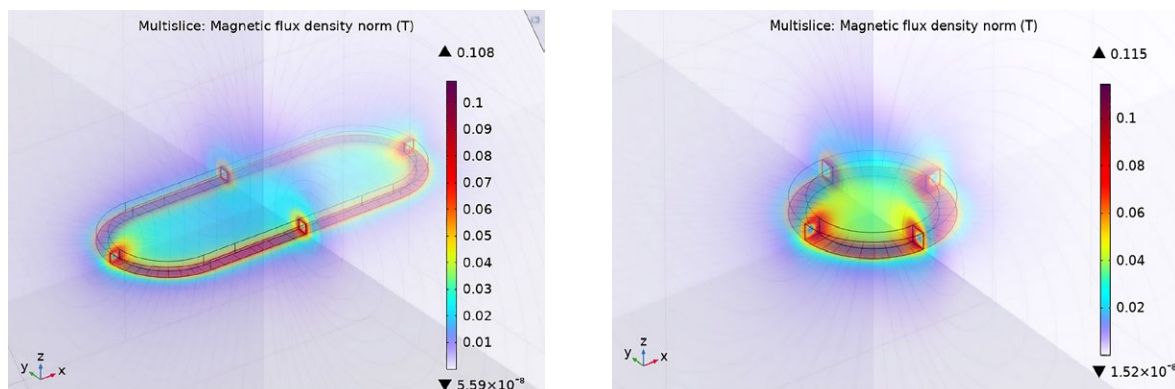


Рис. 3. Расчетные распределения магнитного поля (Тл) рейстрек-катушки (слева) и кольцевой обмотки (справа) при амплитуде постоянного транспортного тока 85 А. Количество обмоток в каждой из катушек составляет 40. Критический ток лент 120 А

Fig. 3. Calculated magnetic field distributions (T) of the racetrack coil (left) and the ring winding (right) at a constant transport current amplitude of 85 A. The number of windings in each coil is 40. The critical current of the tapes is 120 A

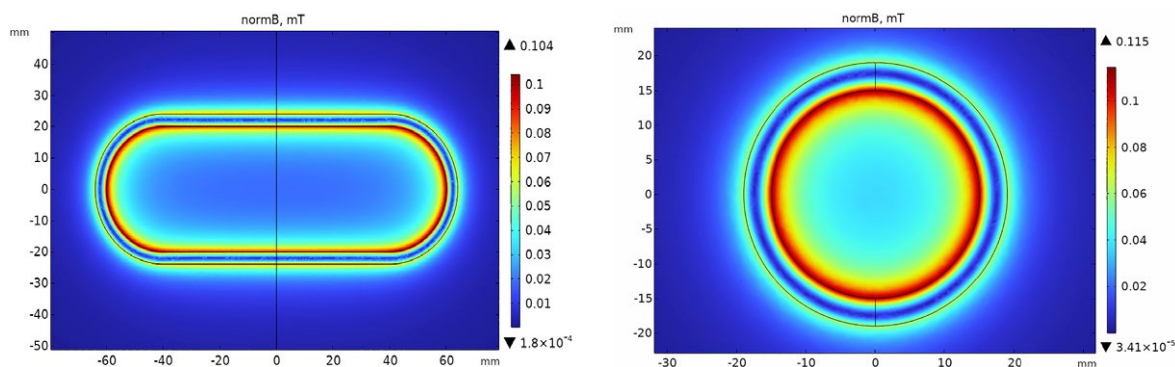


Рис. 4. Распределения магнитного поля (Тл) в центральном сечении незамкнутых ВТСП катушек при транспортном токе 85 А ($\sim 0,7 J_c$). Количество обмоток в каждой из катушек составляет 40. Критический ток лент 120 А

Fig. 4. Magnetic field distributions (T) in the central cross-section of the non-closed HTS coils at a transport current of 85 A ($\sim 0.7 J_c$). The number of windings in each coil is 40. The critical current of the ribbons is 120 A

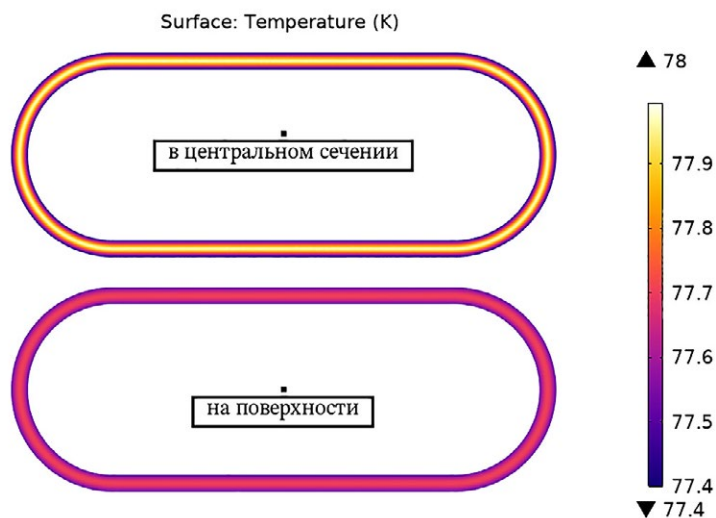


Рис. 5. Распределения температур в центральном сечении и на поверхности 40-слойной рейстрек-катушки при пропускании через нее постоянного транспортного тока амплитуды 85 А

Fig. 5. Temperature distribution in the central section and on the surface of a 40-layer racetrack coil with a constant transport current of 85 A amplitude being transmitted

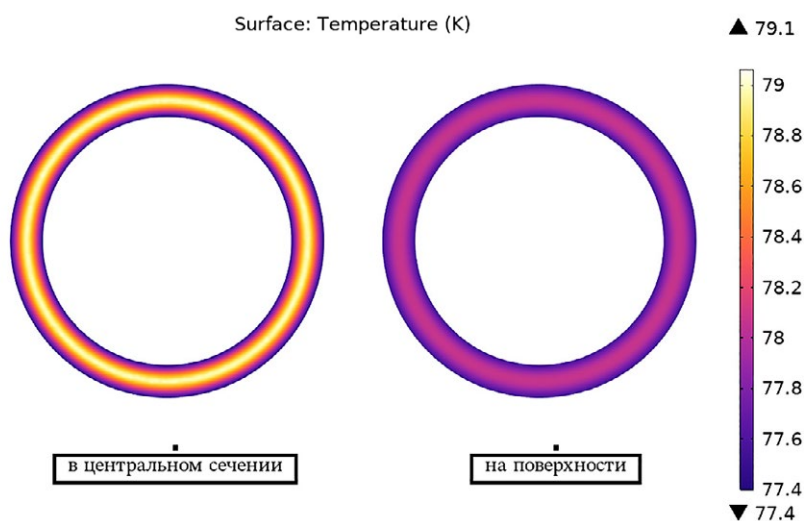


Рис. 6. Распределения температур в центральном сечении и на поверхности 40-слойной кольцевой обмотки при пропускании через нее постоянного транспортного тока амплитуды 85 А

Fig. 6. Temperature distribution in the central section and on the surface of a 40-layer ring winding with a constant transport current of 85 A amplitude being transmitted

Такие различия в тепловом поведении рассматриваемых обмоток, по всей видимости, обусловлены различной площадью поверхности контакта кабелей с хладагентом. Увеличение температуры системы почти

на два градуса при азотном охлаждении, на самом деле, является очень значимым, ведь, согласно экспериментальной критической поверхности, это изменение температуры приводит к снижению критического тока ВТСП лент на $\sim 20\%$.

Моделирование с учетом возможности варьирования критического тока по длине образцов на 15% (Рис. 7) показывает, что для кольцевой ВТСП обмотки из 40 слоев напряжение начинает превышать критерий 1 мкВ/см уже при величине транспортного тока $\sim 75 \text{ А}$, то есть критический ток ВТСП кабеля снизился почти на 38% в сравнении с исходной ВТСП лентой. Критический ток рейстрек-катушки при заданных условиях охлаждения составил немногим более 89 А – порядка 74% процентов от начального критического тока композита. Отдельная же ВТСП лента при наличии неоднородности критического тока сохраняет номинальное значение J_c , но демонстрирует небольшие скачки напряжения при токах ниже критического. Отличие напряжения на одиночной ВТСП ленте от строгого нуля при токах меньших, чем J_c , обусловлено именно неоднородностью критического тока, вследствие которой происходят

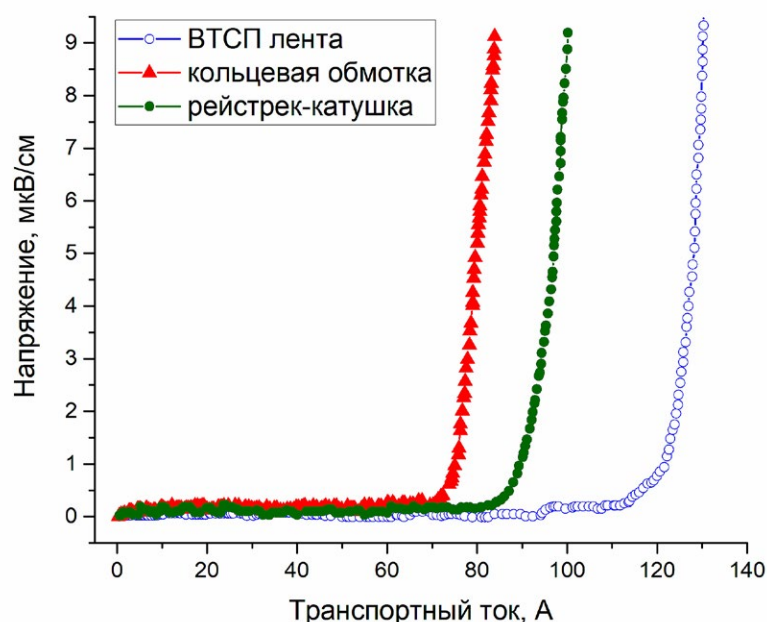


Рис. 7. Расчетные вольтамперные характеристики исходной ВТСП ленты, кольцевой обмотки и рейстрек-катушки с учетом варьирования критического тока лент по длине на величину 15%

Fig. 7. Calculated voltampere characteristics of the initial HTS tape, ring winding and racetrack coil taking into account the variation of the critical current of the tapes along their length by the value of 15%

локальные всплески тепловыделения, которые быстро отводятся хладагентом, контактирующим с ВТСП лентой по всему периметру.

Расчет потерь на переменном токе выполнен для различных частот и амплитуд токовой нагрузки. Частота переменного тока соответствует условиям проведения экспериментальных исследований, в рамках которого во избежание дополнительных наводок от электрических сетей, помимо частоты 50 Гц, исследовались частоты, не кратные 50. На Рис. 8 и Рис. 9 приведены расчетные и экспериментальные зависимости потерь на переменном токе соответственно в рейстрек-катушке и кольцевой обмотке за цикл нагрузки от величины токовой нагрузки для различных частот переменного транспортного тока. Результаты численного моделирования с хорошей точностью согласуются с экспериментальными данными. Потери в круговой обмотке превышают потери в рейстрек-катушках на величину от 7% до 28%, причем это различие увеличивается с ростом частоты переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований, направленных на анализ магнитных

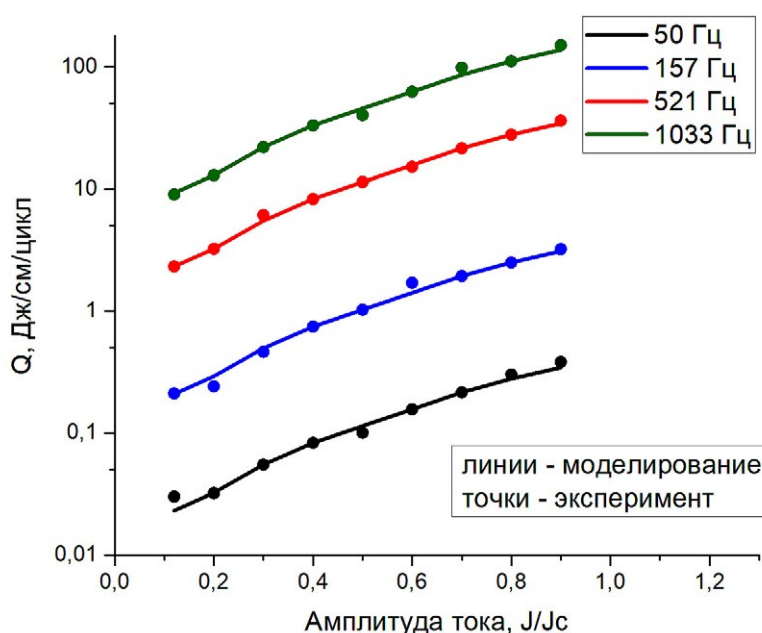


Рис. 8. Расчетные логарифмические зависимости потерь на цикл от амплитуды переменного тока для рейстрек-катушки, охлаждаемой жидким азотом

Fig. 8. Calculated logarithmic dependences of the cycle losses on the AC amplitude for a racetrack coil cooled with liquid nitrogen

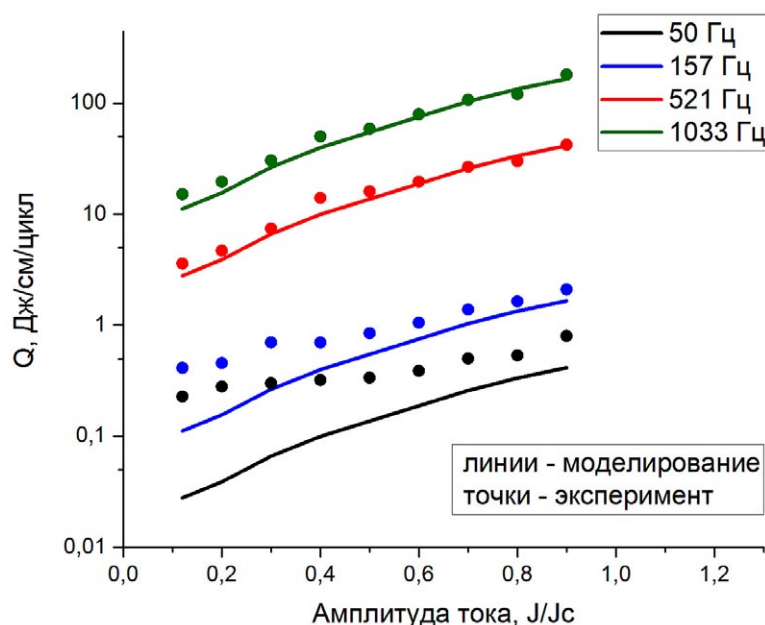


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные логарифмические зависимости потерь на цикл от амплитуды переменного тока для незамкнутой кольцевой обмотки при охлаждении жидким азотом

Fig. 9. Experimental and calculated logarithmic dependences of the cycle losses on the AC current amplitude for a non-closed ring winding under liquid nitrogen cooling

и транспортных характеристик наиболее перспективных ВТСП элементов генератора: рейстрек-катушек и незамкнутых круговых обмоток. Для этих геометрий, характерных для электромагнитных систем ВТСП генератора, выполнен расчет распределений токов, магнитных полей и температур в условиях воздействия постоянного транспортного тока, а также выполнен расчет потерь на переменном токе при различных амплитудах и частотах токовой нагрузки в условиях охлаждения жидким азотом.

При сравнении свойств незамкнутых ВТСП катушек в виде рейстрека и кольцевой обмотки установлено, что в обоих случаях наибольшему нагреву подвержены внутренние слои обмоток, напрямую контактирующие с хладагентом только с торцов и окруженные, к тому же, другими токонесущими греющимися ВТСП лентами. При этом наибольший нагрев характерен для кольцевых незамкнутых ВТСП катушек. Кроме того, кольцевым катушкам в сравнении с вытянутыми токонесущими элементами свойственны и более высокие магнитные поля на краях обмотки. Наличие вышеуказанных недостатков приводит к тому, что критический ток кольцевой обмотки при охлаждении жидким азотом деградирует на величину порядка 38% от первоначального тока композита,

тогда как рейстрек-катушка демонстрирует снижение токонесущей способности лишь на 26%. В диапазоне частот от 50 до 1033 Гц для амплитуд транспортного тока от 0,1 до 0,9 от величины критического тока ВТСП лент проведено исследование потерь на переменном токе рассматриваемых конфигураций ВТСП обмоток. Результаты численного анализа находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Анализ потерь на переменном токе для незамкнутых ВТСП катушек показал, что наиболее высокий уровень тепловых потерь наблюдается для кольцевой обмотки.

Таким образом, установлено, что в условиях охлаждения жидким азотом рейстрек-катушки обладают более высокими магнитными и транспортными характеристиками в сравнении с замкнутыми кольцевыми ВТСП элементами, на что решающее влияние оказывает их геометрический фактор. Наиболее выгодной конфигурацией обмотки элементов ВТСП генератора при азотном охлаждении является рейстрек-катушка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

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. Barnes P.N., Sumption M.D., Rhoads G.L. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings // Cryogenics. 2005. Vol. 45, N 10. P. 670–86. doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.09.001
2. Haran K.S., Kalsi S., Arndt T., et al. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap // Superconductor Science and Technology. 2017. Vol. 30, N 12. P. 123002. doi: 10.1088/1361-6668/aa833e
3. Kalsi S.S., Weeber K., Takesue H., et al. Development status of rotating machines employing superconducting field windings // Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92, N 10. P. 1688–704. doi: 10.1109/JPROC.2004.833676

4. Kim C., Sung H.J., Go B.S., et al. Design, Fabrication, and Testing of a Full-Scale HTS Coil for a 10 MW HTS Wind Power Generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Vol. 31, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2021.3059223
5. Song X., Mijatovic N., Kellers J., et al. A Pole Pair Segment of a 2-MW High-Temperature Superconducting Wind Turbine Generator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017. Vol. 27, N 4. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2017.2656778
6. Gamble B., Snitchler G., MacDonald T. Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21, N 3. P. 1083–8. doi: 10.1109/TASC.2010.2093854
7. Moon H., Kim Y.-C., Park H.-J., et al. An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application // *Superconductor Science and Technology*. 2016. Vol. 29, N 3. P. 034009. doi: 10.1088/0953-2048/29/3/034009
8. Sivasubramaniam K., Zhang T., Lokhandwalla M., et al. Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2009. Vol. 19, N 3. P. 1656–61. doi: 10.1109/TASC.2009.2017758
9. Terao Y., Seta A., Ohsaki H., et al. Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2902323
10. Hahn S., Park D.K., Bascunan J., Iwasa Y. HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21, N 3. P. 1592–5. doi: 10.1109/TASC.2010.2093492
11. Zaneagin S.Y., Ivanov N.S., Shishov D.M., et al. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1559, N 1. P. 012142. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012142
12. Zhang G., Chen B., Song F., et al. Optimal Design of an Innovative High Temperature Superconducting Generator With the Evaporative Cooling Stator and the Magnetic Flux Oriented Rotor // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2007. Vol. 17, N 2. P. 1545–8. doi: 10.1109/TASC.2007.898197
13. Gao Y., Wang W., Wang X., et al. Design and Study of a 2G HTS Synchronous Motor With Brushless HTS Flux Pump Exciters // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, N 5. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2898505
14. Jeon H., Lee J., Han S., et al. PID Control of an Electromagnet-Based Rotary HTS Flux Pump for Maintaining Constant Field in HTS Synchronous Motors // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Vol. 28, N 4. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2018.2822704
15. Alexandrov D.A., Martirosian I.V., Pokrovskii S.V., et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes // *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024. Vol. 10, N 2. P. 215–230. doi: 10.17816/transsyst632274

REFERENCES

1. Barnes PN, Sumption MD, Rhoads GL. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. *Cryogenics*. 2005;45(10):670–86. doi: 10.1016/j.cryogenics.2005.09.001
2. Haran KS, Kalsi S, Arndt T, et al. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap. *Superconductor Science and Technology*. 2017;30(12):123002. doi: 10.1088/1361-6668/aa833e
3. Kalsi SS, Weeber K, Takesue H, et al. Development status of rotating machines employing superconducting field windings. *Proceedings of the IEEE*. 2004;92(10):1688–704. doi: 10.1109/JPROC.2004.833676
4. Kim C, Sung HJ, Go BS, et al. Design, Fabrication, and Testing of a Full-Scale HTS Coil for a 10 MW HTS Wind Power Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021;31(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2021.3059223
5. Song X, Mijatovic N, Kellers J, et al. A Pole Pair Segment of a 2-MW High-Temperature Superconducting Wind Turbine Generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):1–5. doi: 10.1109/TASC.2017.2656778
6. Gamble B, Snitchler G, MacDonald T. Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011;21(3):1083–8. doi: 10.1109/TASC.2010.2093854
7. Moon H, Kim Y-C, Park H-J, et al. An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application. *Superconductor Science and Technology*. 2016;29(3):034009. doi: 10.1088/0953-2048/29/3/034009
8. Sivasubramaniam K, Zhang T, Lokhandwalla M, et al. Development of a High Speed HTS Generator for Airborne Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2009;19(3):1656–61. doi: 10.1109/TASC.2009.2017758
9. Terao Y, Seta A, Ohsaki H, et al. Lightweight Design of Fully Superconducting Motors for Electrical Aircraft Propulsion Systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2902323
10. Hahn S, Park DK, Bascunan J, Iwasa Y. HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011;21(3):1592–5. doi: 10.1109/TASC.2010.2093492
11. Zanegin SY, Ivanov NS, Shishov DM, et al. AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1559(1):012142. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012142
12. Zhang G, Chen B, Song F, et al. Optimal Design of an Innovative High Temperature Superconducting Generator With the Evaporative Cooling Stator and the Magnetic Flux Oriented Rotor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2007;17(2):1545–8. doi: 10.1109/TASC.2007.898197
13. Gao Y, Wang W, Wang X, et al. Design and Study of a 2G HTS Synchronous Motor With Brushless HTS Flux Pump Exciters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(5):1–5. doi: 10.1109/TASC.2019.2898505

14. Jeon H, Lee J, Han S, et al. PID Control of an Electromagnet-Based Rotary HTS Flux Pump for Maintaining Constant Field in HTS Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(4):1–5. doi: 10.1109/TASC.2018.2822704
15. Alexandrov DA, Martirosian IV, Pokrovskii SV, et al. Energy capacity and energy losses of inductive energy storage device based on composite HTS tapes *MTST*. 2024;10(2):215–30. doi: 10.17816/transsyst632274

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук,

инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,

заведующий научно-исследовательской лабораторией;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,

research engineer;

eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;

E-mail: mephizic@gmail.com

Dmitrii A. Aleksandrov, research engineer;

eLibrary SPIN: 5365-6190; ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,

Head of the Laboratory;

eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst660869>

© А.В. Саушев, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, В.О. Гуськов

Государственный университет морского и речного флота

имени адмирала С.О. Макарова

(Санкт-Петербург, Россия)

ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ МНОГОФАЗНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПО КРИТЕРИЮ ДИСПЕРСИИ ТОКА В НАГРУЗКЕ

Цель. Разработка оптимальных по критерию дисперсии тока в нагрузке алгоритмов многофазной широтно-импульсной модуляции в системе преобразователь–электродвигатель.

Материалы и методы. Для исследования процессов многофазной 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 многофазной широтно-импульсной модуляции в системе преобразователь–электродвигатель. Показано, что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя напряжения могут быть использованы полнофазные и неполнофазные алгоритмы широтно-импульсной модуляции. Проанализированы выражения для модулирующих функций многофазных напряжений полумостов преобразователя напряжения. Получено выражение для локальной дисперсии тока в нагрузке многофазной мостовой цепи. Найдены численные значения коэффициентов смещения импульсов, позволяющие получить минимум локальной дисперсии тока для случаев полнофазной и неполнофазной многофазной широтно-импульсной модуляции. Получено выражение для оптимальной функции предмодуляции, позволяющее избежать перемодуляции при любых значениях коэффициента амплитуды при заданных ограничениях. Найдено выражение для граничного коэффициента модуляции многофазного моста для синусоидальных модулирующих функций напряжения.

Закключение. Результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления многофазных преобразователей напряжения в системах автоматизированного электропривода.

Ключевые слова: многофазная широтно-импульсная модуляция; полнофазные и неполнофазные алгоритмы; система преобразователь–электродвигатель; дисперсия тока в нагрузке; предмодуляция.

Как цитировать:

Саушев А.В., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф., Гуськов В.О. Оптимальные алгоритмы многофазной широтно-импульсной модуляции по критерию дисперсии тока в нагрузке // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 60–77. doi: 10.17816/transsyst660869

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© A.V. Saushev, I.V. Belousov, V.F. Samoseiko, V.O. Guskov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

(St. Petersburg, Russia)

OPTIMAL ALGORITHMS OF MULTIPHASE PULSE WIDTH MODULATION BASED ON LOAD CURRENT DISPERSION

Aim. Development of algorithms for multiphase pulse width modulation in the converter-to-electric motor system that are optimal in terms of the load current dispersion in the load.

Materials and Methods. To study the processes of multiphase pulse width modulation in frequency control of electric drives in the converter-to-electric motor system, methods of electrical circuit theory are used; the proposed algorithms are illustrated by figures and can be implemented in the MATLAB software environment.

Results. We considered the process of multiphase pulse width modulation in the converter-to-electric motor system. We demonstrated that full-phase and non-full-phase pulse width modulation algorithms can be used to minimize the number of switching operations of voltage switch converter keys. We analyzed expressions for modulating functions of multiphase voltages of half-bridges of voltage switch converters. We produced an expression for the local dispersion of the load current of a multiphase bridge circuit. We found numerical values of the pulse displacement coefficients which make it possible to obtain a minimum value of local current dispersion for cases of full-phase and non-full-phase multiphase pulse width modulation. We produced an expression for the optimal pre-modulation function, which allows us to avoid over-modulation at any values of the amplitude coefficient under given restrictions. We found an expression for the cutoff modulation coefficient of a multiphase bridge for sinusoidal modulating voltage functions.

Conclusion. The results can be used for development of control algorithms for multiphase voltage switch converters in automated electric drive systems.

Keywords: multiphase pulse width modulation; full-phase and non-full-phase algorithms; converter-to-electric motor system; load current dispersion; pre-modulation.

To cite this article:

Saushev AV, Belousov IV, Samoseiko VF, Guskov VO. Optimal algorithms of multiphase pulse width modulation based on load current dispersion. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):60–77. doi: 10.17816/transsyst660869

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость модуляции многофазного напряжения появляется при питании потребителей большой мощности [1–5]. Такая необходимость особенно актуальна для транспортных электромеханических систем, основу которых составляют электроприводы. При этом, в большинстве случаев, для управления электроприводами применяются системы частотного скалярного и векторного управления, построенные на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а в качестве преобразователей электрической энергии используются импульсные (электронно-ключевые) преобразователи напряжения [6–10]. Широкое применение многофазные преобразователи находят в судовом и корабельном электроприводе при синтезе структуры систем электродвижения [5, 11]. Важнейшее значение при разработке гребных электроприводов имеют задачи синтеза оптимальных по заданному критерию алгоритмов управления гребным электроприводом. От выбора алгоритма управления во многом зависят энергетические и эксплуатационные показатели качества главной энергетической установки судна. При этом с ростом энерговооруженности судов роль алгоритмов управления становится все более важной.

В работе [12] установлено, что основным показателем, определяющим качество модуляции в системе преобразователь-электродвигатель, является дисперсия тока. Важным показателем качества является также число коммутаций ключевых элементов преобразователя, которые определяют потери энергии. Для уменьшения этого показателя на практике применяют неполнофазную широтно-импульсную модуляцию (Н-ШИМ) [1, 8–10, 13–15].

Алгоритмы многофазной модуляции напряжения реализуются на многофазных электронно-ключевых мостах, состоящих в общем случае из m полумостов. Схема m -фазного электронно-ключевого моста представлена на Рис. 1. В схеме присутствует m верхних ключей и m нижних ключей. Узлы полумостов, в которых соединяются верхний и нижний ключи, будем нумеровать $X = 1, 2, \dots, m$. Потенциал ϕ_N узла N принят за ноль. Потенциал ϕ_M узла M равен напряжению звена постоянного тока преобразователя U_d . Нагрузка подключается к узлам $X = 1, 2, \dots, m$.

Целью настоящей статьи является разработка аналитических алгоритмов оптимального формирования полнофазной широтно-импульсной модуляции (П-ШИМ) и Н-ШИМ по критерию дисперсии

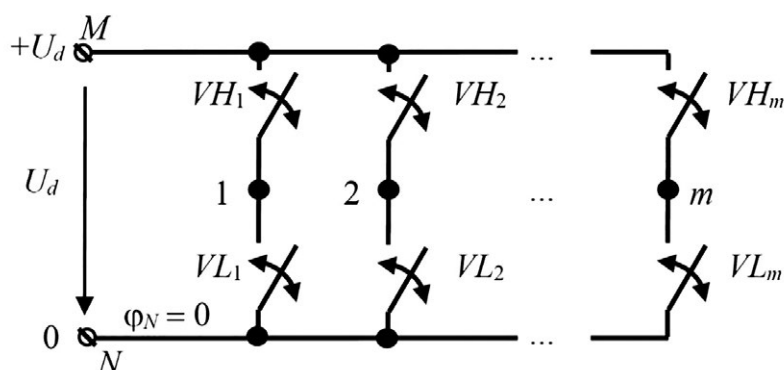


Рис. 1. Схема m -фазного электронно-ключевого моста

Fig. 1. The scheme of the m -phase electronic key bridge

тока в m -фазной нагрузке, в качестве которой выступает приводной электродвигатель. Для решения этой задачи необходимо сформировать модулирующие функции многофазных напряжений на нагрузке.

МОДУЛИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ МНОГОФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Модулирующие функции m -фазных напряжений, как правило, являются периодическими функциями, относительное значение периода которых существенно превышает период модуляции. Относительное значение частоты модуляции f^* фактически является периодом модулирующего напряжения, выраженным в числе периодов модуляции, и обычно превышает значение 10. Понятие числа фаз моста не совпадает с понятием числа фаз модулируемого напряжения при $m = 2$. Обычно полагается, что двухфазный мост (из двух полумостов) синтезирует импульсное однофазное напряжение. При $m > 2$ m -фазный мост может питать модулированным напряжением m -фазную нагрузку.

При нечетном числе фаз периодические модулирующие функции m -фазных напряжений полагаются симметричными функциями. Их фазные углы сдвинуты между собой на угол $\rho = 2 \cdot \pi / m$, называемый углом фазового сдвига. Амплитуды фазных напряжений у всех фаз одинаковы. Отношение минимальных амплитуд межфазных напряжений к фазным амплитудам напряжений

$$k_{\min} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\rho}{2}\right).$$

Отношение максимальных амплитуд межфазных напряжений к фазным амплитудам напряжений

$$k_{\max} = 2 \cdot \cos\left(\frac{\rho}{4}\right). \quad (1)$$

При $m \rightarrow \infty$ значение $k_{\min} \rightarrow 0$, а $k_{\max} \rightarrow 2$.

Если модулирующие функции являются синусоидальными функциями времени, то:

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

где g_X – модулирующие функции; $X = 1, 2, \dots, m$; a – коэффициент амплитуды модуляции напряжения.

Запишем выражение для приращения модулирующих функций на периоде ШИМ:

$$\Delta g_X = \frac{\partial g_X}{\partial \tau} = -\frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{k_{\max} \cdot f^*} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} - (X-1) \cdot \rho\right). \quad (3)$$

Для симметричных модулирующих функций m -фазных напряжений выполняются условия:

$$\sum_{X=1}^m g_X = 0; \quad \sum_{X=1}^m \Delta g_X = 0.$$

На комплексной плоскости $\{1, j\}$ введем фазовые оси

$$\dot{e} = \exp(j \cdot (X-1) \cdot \rho),$$

где j – мнимая единица. Тогда следующая сумма векторов

$$\sum_{X=1}^m g_X \cdot \dot{e} = \frac{m}{2} \cdot \frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{k_{\max} \cdot f^*} \cdot \exp\left(j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right),$$

образует на комплексной плоскости $\{1, j\}$ вращающийся вектор с угловой скоростью $2 \cdot \pi \cdot \tau / f^*$. Скорость вращения вектора может регулироваться путем изменения относительной частоты f^* , а его длина – путем изменения коэффициента амплитуды a .

При четном числе фаз модуляция фазных напряжений имеет свои особенности. При угле фазового сдвига $\rho = 2 \cdot \pi / m$ модуляция фазных напряжений с четным числом фаз выполняется на электронно-ключевых m -фазных мостах таких же, как и модуляция фазных напряжений

с нечетным числом фаз. Модулирующие функции на комплексной плоскости $\{1, j\}$ также образуют вращающиеся векторы. В этом случае с позиций модуляции фазных напряжений нет методологических отличий. Однако следует заметить, что $2 \cdot m$ -фазной электронно-ключевой преобразователь, будет эквивалентен формированию m -фазной системы напряжений с углом фазового сдвига $\rho = \pi/m$. Это следует из векторной диаграммы фазных напряжений, приведенной для $m = 4$ на Рис. 2.

Из данного рисунка следует, что модулирующие функции фаз g_1, g_3 и g_2, g_4 будут работать в электрической машине как две эквивалентные фазы. Для того чтобы каждая фаза работала самостоятельно, периодические модулирующие функции m -фазных напряжений g_X должны быть одинаковыми и смещенными на угол фазового сдвига $\rho = \pi/m$. В этом случае сумма модулирующих фазных напряжений

$$\sum_{X=1}^m g_X \neq 0.$$

Схемная реализация модуляции четного и нечетного числа функций g_X при угле фазового сдвига $\rho = \pi/m$ различаются. Например, при $m = 2$ модулированные напряжения могут быть реализованы на электронно-ключевых схемах, приведенных на Рис. 3.

Модулирующие функции полумостов в схеме на Рис. 3, а определяются выражениями

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} + g_1; \quad \gamma_2 = \frac{1}{2} + g_2.$$

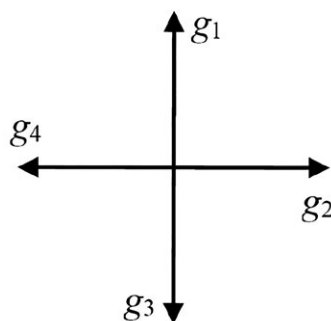


Рис. 2. Векторная диаграмма фазных напряжений при угле фазового сдвига $\rho = 2 \cdot \pi/m$ и $m = 4$

Fig. 2. Vector diagram of phase voltages at the phase shift angle $\rho = 2 \cdot \pi/m$ and $m = 4$

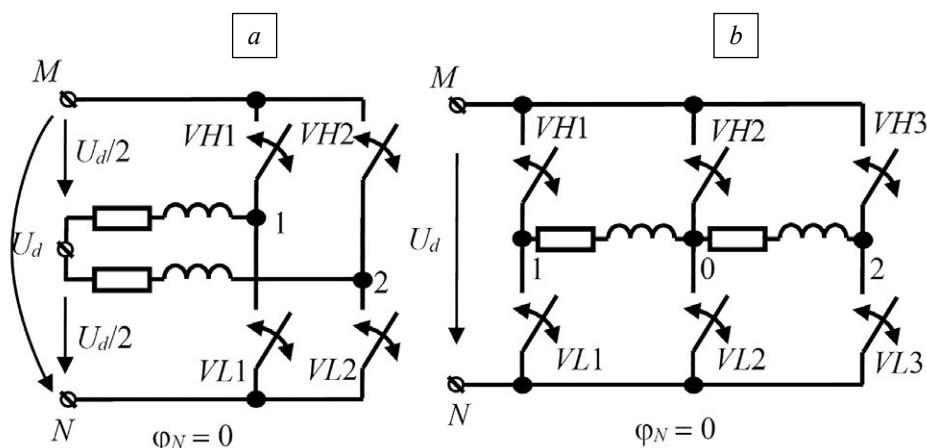


Рис. 3. Схемы модуляции двухфазных напряжений на: а) трехуровневом двухфазном мосту; б) двухуровневом трехфазном мосту

Fig. 3. Two-phase voltage modulation schemes on: a) a three-level two-phase bridge; b) a two-level three-phase bridge

Модулирующие функции полумостов в схеме на Рис. 3, б, определяются выражениями:

$$\gamma_0 = \frac{1}{2} + g_1 + g_2; \quad \gamma_2 = \frac{1}{2} + g_1; \quad \gamma_1 = \frac{1}{2} + g_2.$$

С технической точки зрения реализация таких электронно-ключевых схем не целесообразна. Если четное число фаз $m \neq 2^n$, то целесообразно использовать комбинации мостовых схем с нечетным числом фаз, где $n = 1, 2, \dots$. Так, например, если $m = 6 \cdot n$, то модуляцию фазных напряжений целесообразно вести n трехфазными мостами со сдвигом фаз между ними на угол $\rho = \pi/m$. Например, если $m = 14$, то модуляцию фазных напряжений целесообразно вести двумя семифазными мостами со сдвигом фаз между ними на угол $\rho = \pi/14$.

Таким образом, модуляцию m -фазных напряжений целесообразно вести при угле фазового сдвига $\rho = 2 \cdot \pi/m$. Если требуется реализовать модулированную систему напряжений с четным числом фаз, то ее следует синтезировать путем комбинации мостов с нечетным числом фаз.

ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МНОГОФАЗНОЙ ПОЛНОФАЗНОЙ ШИМ ПО КРИТЕРИЮ ДИСПЕРСИИ ТОКА В НАГРУЗКЕ

Каждый из m полумостов (Рис. 1) имеет две управляющие переменные. Таким образом, число управляющих переменных, для трехфазной системы

межфазных напряжений, равно $2 \cdot m$. Число межфазных напряжений, которые должны быть синтезированы путем ШИМ, равно m . Однако, сумма этих напряжений всегда равна нулю. Следовательно, межфазные напряжения связаны между собой. Таким образом, число заданных переменных управления будет равно $m - 1$, а число степеней свободы, которые позволяют реализовать эти напряжения равно $m + 1$.

Так как обычно необходимо сформировать синусоидальную систему токов в нагрузке, то минимизация интегральной дисперсии токов, как уже отмечалось ранее, влечет за собой минимизацию состава высших гармоник токов нагрузки.

Управление полумостами осуществляется так, что в процессе функционирования моста в каждый момент времени замкнут нижний ключ или верхний ключ. Для каждого из полумостов X на основе работы [12] можно задать коммутационные функции χ_X ключевых элементов:

$$\chi_X = 1 \left(\frac{\gamma_X}{2} + \frac{1}{2} + \Delta\alpha_X - \phi \right) \cdot 1 \left(\frac{\gamma_X}{2} - \frac{1}{2} - \Delta\alpha_X + \phi \right),$$

где γ_X – модулирующая функция полумоста; $\Delta\alpha_X$ – коэффициент смещения импульса относительно центра интервала модуляции; ϕ – левосторонняя периодическая пилообразная функция. Если $\chi_X = 1$, то включен верхний ключ полумоста X , а если $\chi_X = 0$ – включен нижний ключ.

Каждый из ключей коммутируется на интервале ШИМ не более одного раза. Коэффициенты смещения импульсов $\Delta\alpha_X$ и модулирующие функции γ_X являются управляющими переменными ключей полумостов $X = 1, 2, \dots, m$. Таким образом, задачей синтеза алгоритма управления является определение управляющих переменных ключей $\Delta\alpha_X, \gamma_X$ по критерию минимума дисперсии тока в m -фазной нагрузке моста.

Оптимальная функция предмодуляции. Пусть заданы функции g_X , для которых выполняются условия:

$$\sum_{X=1}^m g_X = 0; \quad \sum_{X=1}^m \Delta g_X = 0. \quad (4)$$

Модулирующие функции γ_X можно записать в виде:

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X - g_0, \quad (5)$$

где g_0 – функция предмодуляции m -фазного моста.

Модулирующие функции межфазных напряжений

$$g_{XY} = \gamma_X - \gamma_Y = g_X - g_Y$$

не зависят от функции предмодуляции g_0 . Следовательно, эта функция может быть выбрана так, чтобы обеспечить минимум дисперсии тока в нагрузке. Для числа фаз $m = 3$ функция предмодуляции согласно работе [12] определяется выражением:

$$g_0 = g_0^0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{g_A \cdot g_B \cdot g_C}{g_A^2 + g_B^2 + g_C^2}.$$

Пусть $m = 4$. Запишем выражение для локальной дисперсии тока в нагрузке D_{XY} на временном отрезке, где $g_1 > g_2 > g_3 > g_4$:

$$D_{XY} = \frac{D_{12} + D_{13} + D_{14} + D_{23} + D_{24} + D_{34}}{4}. \quad (6)$$

На основании работы [12]:

$$D_{XY} = \int_0^1 (j_{XY}^*(\phi) - i_{XY}^*(\phi))^2 \cdot d\tau,$$

где j_{XY}^* – относительный ток, порождаемый модулирующей функцией линейного напряжения g_{XY} ; i_{XY}^* – относительный ток, порождаемый модулированной функцией линейного напряжения χ_{XY} ; $X, Y = 1, 2, 3, 4$.

Подставляя выражение (5) в формулу (6) получим дисперсии тока в виде функции $D_{XY} = D_{XY}(g_1, g_2, g_3, g_4, g_0)$. Нетрудно показать, что минимум дисперсии тока $D_{XY}(g_1, g_2, g_3, g_4, g_0)$ определяется выражением

$$g_0 = \frac{m}{2} \cdot \frac{\sum_{X=1}^m g_X^3}{\sum_{X=1}^m g_X^2}, \quad (7)$$

где m – число фаз, равное 4.

Обобщим формулу (7) для оптимальной по критерию дисперсии тока в нагрузке функции предмодуляции на произвольное число фаз m .

Если $m \neq 3$ и $\sum_{X=1}^m g_X = 0$, то $\sum_{X=1}^m g_X^3 = 0$. Следовательно, при $m \neq 3$

оптимальная функция предмодуляции $g_0 = 0$. При $m = 3$, как показано

в работе [12], оптимальная функция предмодуляции определяется выражением

$$g_0 = g_0^0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{g_A \cdot g_B \cdot g_C}{g_A^2 + g_B^2 + g_C^2},$$

а коэффициенты смещения импульсов между полумостами, при которых локальная дисперсия тока принимает минимальное значение, при учете выполнения условий (4) могут быть найдены из формулы:

$$\Delta\alpha_X = \frac{11}{96} \cdot \Delta g_X. \quad (8)$$

Эти коэффициенты определяют локальную дисперсию токов в нагрузке (6), которая близка к минимальному значению.

Для синусоидальных модулирующих функций напряжений (2), граничный коэффициент модуляции m -фазного моста при $g_0 = 0$ будет определяться выражением:

$$z_{(1)} = \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right) < 1, \quad (9)$$

где m – число фаз электронно-ключевого моста.

Граничное значение коэффициента амплитуды при $m \rightarrow \infty$ стремится к единице. Так при $m = 5$ $z_{(1)} = 0,951$, а при $m = 7$ $z_{(1)} = 0,975$. Значения $a > z_{(1)}$ ведут к перемодуляции и увеличению дисперсии тока из-за искажения модулирующих функций напряжений. Так как граничный коэффициент модуляции меньше единицы, то полное использование напряжения источника питания в алгоритме ШИМ при функции предмодуляции $g_0 = 0$ невозможно.

АЛГОРИТМ МНОГОФАЗНОЙ ПОЛНОФАЗНОЙ ШИМ С ПОЛНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Функция предмодуляции является свободной переменной и определяет многообразие алгоритмов модуляции. Функция предмодуляции (7) определяет алгоритм модуляции с минимальной дисперсией тока. Получим функцию передмодуляции, которая позволяет полностью использовать модулируемое напряжение m -фазного моста и избежать режима перемодуляции при значениях коэффициента амплитуды $a \leq 1$.

Для устранения явления перемодуляции введем ограничения на модулирующие функции полумостов

$$0 \leq \gamma_X \leq 1. \quad (10)$$

Упорядочим модулирующие функции полумостов на интервале ШИМ:

$$0 \leq \gamma_{X(1)} \leq \gamma_{X(2)} \leq \dots \leq \gamma_{X(m)} < 1,$$

где $X(1), X(2), \dots, X(m)$ – новые имена полумостов $X = 1, 2, \dots, m$.

При этом их минимальное $\gamma_{X(1)}$ и максимальное $\gamma_{X(m)}$ значения:

$$\gamma_{X(1)} = \frac{1}{2} + g_{X(1)} - \gamma_0 = 0; \quad \gamma_{X(m)} = \frac{1}{2} + g_{X(m)} - \gamma_0 = 1.$$

Складывая эти два равенства, получим:

$$1 + g_{X(1)} + g_{X(m)} - 2 \cdot g_0 = 1,$$

где $g_0 = 1/2 - \gamma_0$ – функция предмодуляции; γ_0 – нулевая потенциальная функция.

Из условия выполнения неравенства (10) получим:

$$g_0 = \frac{g_{X(1)} + g_{X(m)}}{2} = \frac{\min_{X=1,\dots,m} \{g_X\} + \max_{X=1,\dots,m} \{g_X\}}{2}. \quad (11)$$

Минимальное значение определится из условия:

$$\gamma_{X(1)} = \frac{1}{2} + g_{X(1)} - g_0 = \frac{1 + g_{X(1)} - g_{X(m)}}{2}. \quad (12)$$

Максимальное значение определится из условия:

$$\gamma_{X(m)} = \frac{1}{2} + g_{X(m)} - g_0 = \frac{1 + g_{X(1)} - g_{X(m)}}{2}. \quad (13)$$

Функция предмодуляции (11) исключает возникновение режима перемодуляции, но не является оптимальной по критерию дисперсии тока.

Вид модулирующих функций полумостов пятифазного моста с функцией предмодуляции (11), приведен на Рис. 4.

АЛГОРИТМЫ МНОГОФАЗНОЙ НЕПОЛНОФАЗНОЙ ШИМ

Получим выражение для функции предмодуляции, которое минимизирует число коммутаций ключей m -фазного моста. Полумосты,

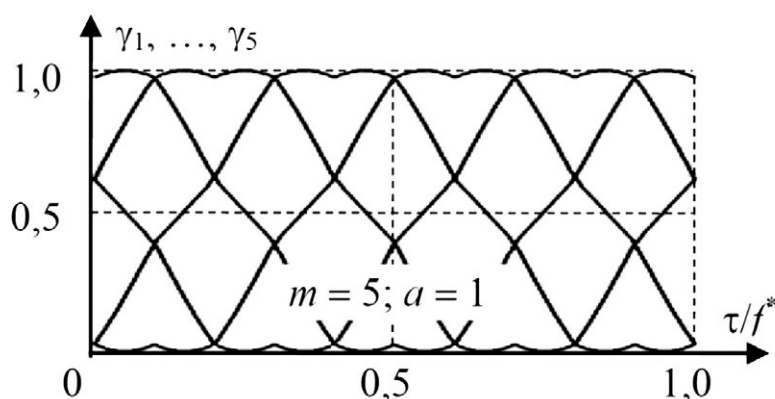


Рис. 4. Модулирующие функции потенциалов полумостов 5-фазного моста при $a=1$ с функцией предмодуляции (11)

Fig. 4. Modulating functions of the half-bridge potentials of a 5-phase bridge at $a=1$ with a premodulation function (11)

из которых состоит m -фазный мост, будем нумеровать $X = 1, 2, \dots, m$. Модулирующие функции фазных напряжений g_X :

$$g_{X(1)} > g_{X(2)} > \dots > g_{X(m)}. \quad (14)$$

Алгоритм ШИМ с включением верхних ключей полумостов. Неравенства (14) разобьем на m групп по два в каждой, в которых модулирующие функции фазных напряжений g_X имеют максимальные значения. Положим, что имеет место первая группа неравенств, в которой наибольшая модулирующая функция напряжения

$$g_{X(1)} = \max(g_X)_{X=1,2,\dots,m}. \quad (15)$$

Пусть $\chi_{X(1)} = 1$ и включен верхний ключ полумоста $X(1)$. На основании выражения (5) получим:

$$\gamma_{X(1)} = \frac{1}{2} + g_{X(1)} - \gamma_0 = 1. \quad 1 > \gamma_{X(2)} > \dots > \gamma_{X(m)}.$$

Таким образом, пока выполняется равенство (15), возможна модуляция межфазных напряжений g_{XY} , где $X, Y = 1, 2, \dots, m$. При этом верхний ключ полумоста $X(1)$ будет все время включен. Общее число N включений ключей полумостов за период модулирующих функций фазных и межфазных напряжений: $N = 2 \cdot f^* + m$.

Алгоритм ШИМ с включением нижних ключей полумостов. Неравенства (14) разобьем на m групп по два в каждой, в которых

модулирующие функции фазных напряжений g_X имеют минимальные значения. Положим, что имеет место первая группа неравенств, в которой наименьшая модулирующая функция напряжения

$$g_{X(m)} = \min \{g_X\}_{X=1,2,\dots,m}. \quad (16)$$

Будем считать, что $\chi_{X(1)} = 0$ и включен верхний ключ полумоста $X(m)$. На основании выражения (5) получим:

$$\gamma_{X(m)} = \frac{1}{2} + g_{X(m)} - \gamma_0 = 0.$$

Откуда функция предмодуляции:

$$g_0 = g_{X(1)} + \frac{1}{2}.$$

Поскольку $\gamma_{X(m)} = 0$, то выполняются неравенства $\gamma_{X(1)} > \gamma_{X(2)} > \dots > 0$.

Следовательно, до тех пор, пока выполняется равенство (16), возможна модуляция межфазных напряжений g_{XY} , где $X, Y = 1, 2, \dots, m$. При этом нижний ключ полумоста $X(m)$ будет все время включен. В данном случае $N = 2 \cdot f^* + m$.

Алгоритм ШИМ с чередованием включения верхних и нижних ключей полумостов. Данный алгоритм следует использовать с целью обеспечения равномерного нагрева и, как следствие, износа ключевых элементов.

Пусть заданы модулирующие функции фазных напряжений $g_X = g_X(\tau)$. Сформируем булеву функцию x_0 , которая будет определять очередность включенного состояния ключей мостовой схемы (Рис. 1):

$$x_0(\beta) = 1 \left(\prod_{X=1}^m g_X(\tau - \beta) \right), \quad (17)$$

где τ – относительное время; β – параметр сдвига булевой функции.

Используя данную функцию, запишем функцию предмодуляции:

$$g_0(\beta) = \left(\frac{1}{2} - x_0(\beta) + x_0(\beta) \cdot \max \{g_X\}_{X=1,2,\dots,m} + (1 - x_0(\beta)) \cdot \min \{g_X\}_{X=1,2,\dots,m} \right). \quad (18)$$

Подстановка в формулу (18) булевой функции $x_0(\beta)$ определяет функцию предмодуляции g_0 . При этом:

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X - \gamma_0(\beta).$$

Можно показать, что меньшую дисперсию тока обеспечивает алгоритм модуляции со значением $\beta = \pm f^*/(4 \cdot m)$. Число коммутаций ключей полумостов за период межфазных напряжений $N = 2 \cdot (f^* + m)$.

Для уменьшения числа коммутаций N при наличии датчиков нагрева ключей целесообразно чередовать включение верхних и нижних ключей по их тепловому состоянию. Если наблюдается больший нагрев верхних ключей, то следует использовать алгоритм с включением нижних ключей полумостов. Минимизации коммутаций будет иметь место при значении

$$\chi_X = 1 \left(\phi - \frac{1 - \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X \right) \cdot 1 \left(\frac{1 + \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X - \phi \right),$$

где $\Delta\alpha_X$ – коэффициент смещения импульса (8); ϕ – левосторонняя периодическая пилообразная функция относительного времени τ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны оптимальные по критерию дисперсии тока в нагрузке аналитические алгоритмы многофазной широтно-импульсной модуляции. Рассмотрены варианты полнофазной и неполнофазной модуляции. Получено выражение для оптимальной функции предмодуляции, позволяющей избежать перемодуляции при любых значениях коэффициента амплитуды при заданных ограничениях.

Выполненные исследования позволяют синтезировать оптимальные по энергетическим показателям системы управления электроприводами с импульсными преобразователями напряжения большой мощности, для которых все шире применяются многоуровневые схемы преобразователей, позволяющие коммутировать большие токи, протекающие в системе преобразователь-электродвигатель.

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. 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
2. Терешкин В.М., Аитов И.Л., Сергеев Н.А. Исследование алгоритмов управления многофазных мостовых преобразователей // *Электротехника*. 2020. № 6. С. 17–23. EDN: UNKUKN
3. Шевцов Д.А., Полетаев А.С. Многофазные широтно-импульсные модуляторы для устройств с многоканальным принципом преобразования электроэнергии // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25, № 1. С. 180–189. EDN: YSPCХО
4. Олещук В.И., Ермуратский В.В. Многоуровневые преобразователи с симметричным выходным напряжением для мощного шестифазного транспортного электропривода // *Проблемы региональной энергетики*. 2015. № 1 (27). С. 27–34. EDN: TUGLIP
5. Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Способы повышения качества синтезируемого напряжения каскадного преобразователя частоты // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 1. С. 21–45. EDN: YERANS doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.02
6. 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
7. 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. N. 4. P. 991–1001. doi: 10.1109/TPEL.2008.2009635
8. Климов В. Частотно-энергетические параметры шим-инверторов систем бесперебойного питания // *Силовая электроника*. 2009. № 22. С. 66–71. EDN: MVRVPN
9. 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
10. 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. С. 69–72. EDN: YHDFBJ
11. Птах Г.К. Сравнительная оценка электрических двигателей переменного тока асинхронного и синхронного типов с целью применения их в гребных электроустановках ледоколов большой мощности // *Известия высших учебных заведений // Электромеханика*. 2019. Т. 62, № 5. С. 24–30. EDN: ISPZZZ doi: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30

12. 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. № 3(14). С. 463–471. doi: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-463-471
13. 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: 10.1109/28.720446
14. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2011. № 5. С. 53–61. EDN: NRBWQP
15. 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

REFERENCES

1. Bakhovtsev IA, Zinoviev GS. Generalized analysis of the output energy of multiphase multilevel voltage inverters with pulse-width modulation. *Electricity*. 2016;4:26–33. (In Russ.) EDN: WALPQZ
2. Tereshkin VM, Aitov IL, Sergeev NA. Study of control algorithms of multiphase bridge converters. *Jelektrotehnika*, 2020;1:17–23. (In Russ.) EDN: UNKUKN
3. Shevcov DA, Poletaev AS. Multiphase pulse-width modulators for devices with a multi-channel principle of electric power conversion. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta*, 2018;1(25):1–5. (In Russ.) EDN: UNKUKN
4. Oleshchuk VI, Ermuratskij VV. Multilevel converters with symmetrical output voltage for powerful six-phase transport electric drive. *Problemy regional'noj jenergetiki*. 2015;1(27):27–34. (In Russ.) EDN: TUGLIP
5. Gel'ver FA, Belousov IV, Samosejko VF. Methods for improving the quality of the synthesized voltage of a cascade converter of a part. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*. 2020;1:21–45. (In Russ.) EDN: YERANS doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.02
6. 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
7. 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
8. Klimov V. Chastotno-energeticheskie parametry shim-invertorov sistem bespereboynogo 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

9. 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
10. 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.) EDN: YHDFBJ
11. Ptah GK. Comparison of the characteristics of alternating current electric motors of the induction and synchronic types, with the purpose of using them in combustible electric motors of greater power. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jelektromehanika*. 2019;5(62):24–30. (In Russ.) EDN: ISPZZZ doi: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30
12. Belousov IV, Samoseiko VF, Saushev AV. 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
13. 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
14. Chaplygin EE, Khukhtikov SV. Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Electricity*. 2011;5:53–61. (In Russ.) EDN: NRBWQP
15. Saushev AV, Belousov IV, Bova EV, Rumjancev AJu. Non-full-phase algorithms for pulse-width modulation of three-phase voltages in frequency control systems of electric drives. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;2(10):231–246. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst628299

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

Белюсов 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; ORCID: 0000-0003-2407-1922;
E-mail: samoseyko@mail.ru

Гуськов Владимир Олегович, аспирант кафедры «Электропривод и электрооборудования береговых установок»;
ORCID: 0000-0002-9917-1971
E-mail: guskov@inbox.ru

Information about the authors:

Aleksandr V. Saushev, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor, 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; ORCID: 0000-0003-2407-1922; E-mail: samoseyko@mail.ru

Vladimir O. Guskov, postgraduate student, Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations; ORCID: 0000-0002-9917-1971 E-mail: guskov@inbox.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

<https://doi.org/10.17816/transsyst660876>

© В.В. Штанке, В.А. Соломин, А.В. Соломин

Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

СИСТЕМА СЧЕТА И ДИАГНОСТИКИ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Обоснование. Модернизация систем счета и диагностики колесных пар при высоких скоростях движения.

Цель. Повышение точности и качества диагностики колесных пар.

Материалы и методы. Предлагается сочетание новых конструкций магнитоиндукционного датчика Штанке с микропроцессорным блоком формирования сигналов. Используются методы математического моделирования при помощи рядов Фурье и дельта-функции Дирака.

Результаты. Программные алгоритмы для счета и оценки технического состояния колесных пар подвижного состава при высоких скоростях движения.

Заключение. Новая система счета и оценки технического состояния колесных пар повышает качество диагностики при высоких скоростях движения подвижного состава.

Ключевые слова: магнитоиндукционный датчик; блок формирования сигнала; колесная пара; математическое моделирование; программные алгоритмы диагностики.

Как цитировать:

Штанке В.В., Соломин В.А., Соломин А.В. Система счета и диагностики колесных пар железнодорожного подвижного состава // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 78–97. doi: 10.17816/transsyst660876

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Rolling stock of railways, train traction and electrification

© V.V. Shtanke, V.A. Solomin, A.V. Solomin

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

COUNTING AND DIAGNOSTICS SYSTEM FOR WHEELSETS OF RAILWAY ROLLING STOCK

Background. Upgrade of wheelsets counting and diagnostic systems at high speeds.

Aim. Improvement of precision and quality of wheelsets diagnostics.

Materials and Methods. A combination of new designs of the Shtanke magnetoinduction sensor with a microprocessor signal generation unit is proposed. The work employed mathematical modeling using Fourier series and delta-Dirac function.

Results. Software algorithms for calculating and assessing the mechanical condition of wheelsets of rolling stock at high speeds are developed.

Conclusion. A new system for counting and assessing the mechanical condition of wheelsets improves the quality of diagnostics of rolling stock at high speeds.

Keywords: magnetoinduction sensor; signal generation unit; wheelset; mathematical modeling; software diagnostics algorithms.

To cite this article:

Shtanke VV, Solomin VA, Solomin AV. Counting and diagnostics system for wheelsets of railway rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):78–97. doi: 10.17816/transsyst660876

ВВЕДЕНИЕ

На нынешнем этапе развития железнодорожного транспорта актуальны задачи разработки и внедрения единой системы управления движением поездов на высокоскоростных магистральных железных дорогах, основанной на цифровых и микропроцессорных технологиях. В этой системе управления значительную роль играют методы технической диагностики подвижного состава, включающие путевые магнитоиндукционные датчики, определяющие скорость движения, и количество осей колесных пар. Подобные устройства применяются на высокоскоростных магистралях Европы: например, путевые датчики типа RSR180, RSR123 производства компании Frauscher Sensortechnik [1] генерируют аналоговый сигнал с прямоугольными импульсами различной амплитуды для счета осей подвижного состава, что позволяет обнаруживать и проход колес с дефектами гребня. Микропроцессорный преобразователь системы счета осей ACS2000 с интеллектуальным решающим устройством определяет диаметр колеса, скорость прохода состава, фиксирует центр колеса над датчиком.

Зарубежные системы счета осей колесных пар предполагают размещение датчиков над головкой рельса, что усложняет их конструкцию и увеличивает влияние вибрации на качество их сигналов, требует частой их переналадки (калибровки), что снижает надежность их работы и повышает эксплуатационные расходы. Работа подобных систем становится невозможной в условиях Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера из-за большого количества снега и наледей на железнодорожном полотне.

Опыт эксплуатации магнитоиндукционных датчиков в системах мониторинга подвижного состава показал, что данное оборудование, в отличие от зарубежных аналогов, полностью адаптировано к работе в России. Отечественные магнитоиндукционные датчики ДМ12, ШМП12 располагаются под головкой рельса, и их исполнение соответствует стандарту УХЛ1 по ГОСТ 15150-69. В конструкциях этих датчиков предусмотрен обогрев крышек, что исключает напрессовку льда и обеспечивает возможность их эксплуатации в условиях Крайнего Севера. К достоинствам данных магнитоиндукционных путевых датчиков можно отнести отсутствие потребности в электропитании, простоту эксплуатации и обслуживания, вследствие чего они давно и практически повсеместно используются даже при наличии мощных электромагнитных помех.

Магнитоиндукционные датчики счета осей колесных пар разработки научно-внедренческого центра «Безопасность транспорта» (НВЦ БТ) на базе Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) успешно эксплуатируются на железных дорогах нашей страны более 20 лет. Новым этапом работы над ними стала разработка технологии передачи и обработки сигналов усовершенствованных магнитоиндукционных датчиков микропроцессорным устройством на основе цифровых технологий.

В статье представлен метод цифровой обработки сигналов магнитоиндукционных датчиков микропроцессорным устройством блока формирования сигнала (БФС), разработанным в НВЦ БТ. Анализ сигналов аппаратно-программным комплексом отражает реальную картину состояния профиля колесных пар проходящего состава, скорости прохода каждой колесной пары и всего железнодорожного состава, указывает место установки датчика, дату и время прохода поезда. Микропроцессорные технологии обеспечивают минимальную погрешность, высокую точность в оценке параметров модулированных аналоговых сигналов, поступающих от магнитоиндукционных датчиков, достоверность выходных результатов, значительную помехоустойчивость и функциональную гибкость программно-аппаратной реализации, что открывает новые возможности используемого диагностического оборудования при высоких скоростях движения.

Для развития экономики России важны рост и интенсивность грузовых перевозок, что требует значительных вложений, строительства новых железных дорог. В будущем эти инвестиции позволят реализовать проект «Евразия ВСМ», предусматривающий строительство евразийской высокоскоростной магистрали из Китая в Европу через Россию, призванной объединить две основные транспортные системы: транзитную грузовую и китайскую высокоскоростную пассажирскую магистраль [2].

В условиях высокоскоростного движения встает вопрос об автоматизации процесса определения занятости пути и диагностики состояния колесных пар грузового поезда во время движения. Решение указанного вопроса может быть осуществлено только на основе современной микропроцессорной техники, позволяющей повысить эффективность принятия решений в соответствии с эксплуатационными потребностями и обеспечить безопасность железнодорожного транспорта [3]. Наиболее надежными системами контроля профиля гребней колесных пар подвижного состава, скорости состава, счета прошедших

колесных пар являются системы магнитоиндукционных датчиков, устанавливаемых на подошве рельса [3, 4]. Основными преимуществами магнитоиндукционных датчиков по сравнению с оптическими и лазерными являются высокая надежность работы в сложных погодных условиях и низкие энергетические и эксплуатационные затраты. Для широкого внедрения технологии мониторинга профиля колесных пар с использованием магнитоиндукционных датчиков на железнодорожном транспорте перед НВЦ БТ РГУПС стояла задача разработки блока формирования сигнала с программой анализа и цифровой обработки сигнала классификации дефектов колесных пар в режиме реального времени [5]. Для разработки БФС в НВЦ БТ был проведен математический анализ полученных сигналов в системе МАТЛАБ. Исследование позволило классифицировать дефекты колес и перекосы тележек, а также разработать методы диагностирования технического состояния колесных пар и тележек железнодорожных вагонов. На основании проведенных исследований был получен патент [6].

Методика предлагаемого в настоящей работе исследования основана на анализе модулируемого магнитоиндукционным датчиком аналогового сигнала, принимаемого микропроцессорным блоком в течение короткого периода, поскольку измерения проводятся в режиме реального времени. Для изучения сигналов, модулируемых датчиком с последующим преобразованием аналоговых сигналов в цифровые и дальнейшей их обработкой, проанализированы получаемые сигналы при проходе колесной пары без изъянов гребня колеса и при моделировании различных изъянов (дефектов).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА

Сигнал, поступающий от магнитоиндукционного датчика при проходе колесной пары тележки железнодорожного состава над магнитоиндукционным датчиком (Рис. 1), характеризует прохождение колеса без изъянов.

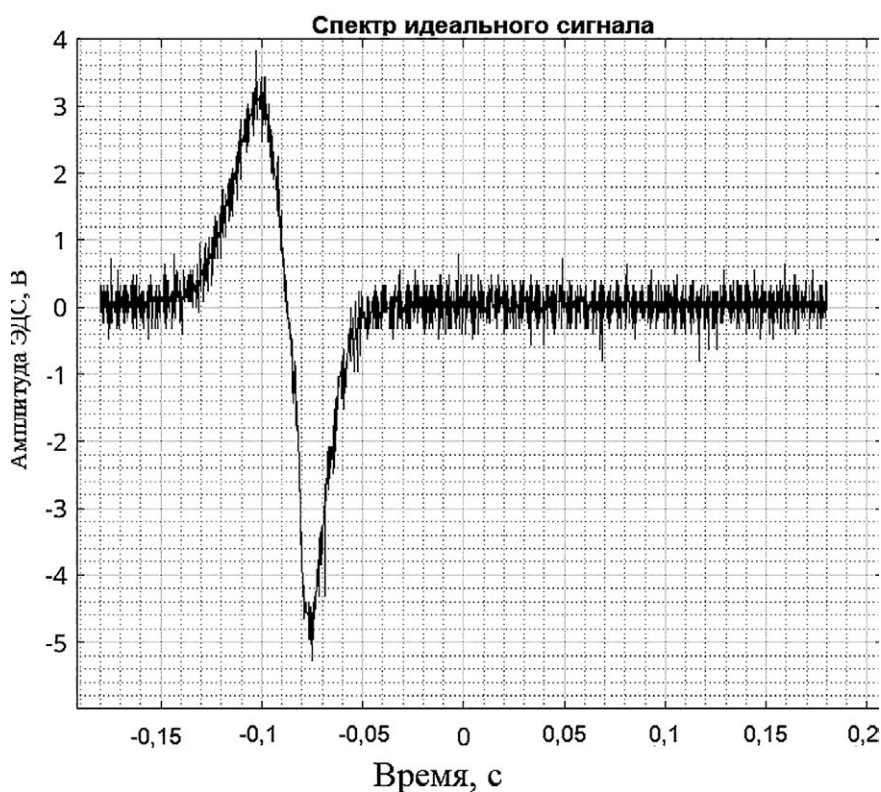


Рис. 1. Сигнал датчика ШМП12 (колесо без изъянов)

Fig. 1. Signal of the SHMP12 sensor (wheel without flaws)

Способ получения выборки дискретных значений аналогового сигнала $s(t)$ заключается в генерировании магнитоиндукционным датчиком эквидистантных стробирующих импульсов (1) [7, 8] в небольшой области точек $t = nT$, в результате чего возникают короткие выборки сигнала длительностью τ , отобранные с интервалом выборки T :

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\tau} \ddot{\mathbf{i}}_{\tau}(t - nT). \quad (1)$$

Оценка дискретного сигнала может быть представлена в виде:

$$s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\tau} \ddot{\mathbf{i}}_{\tau}(t - nT), \quad (2)$$

где $\ddot{\mathbf{i}}_{\tau}$ – прямоугольный импульс длительности τ единичной амплитуды.

При конечной величине τ можно говорить об оценке значения сигнала в момент времени $t_n = nT$ с некоторой погрешностью ввиду изменения сигнала $s(t)$ на интервале τ . При изменении длительности τ

погрешность оценки будет уменьшаться, и в пределе дискретный сигнал будет иметь вид:

$$\begin{aligned} s_{\Delta}(t) &= \lim_{\tau \rightarrow 0} s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{1}{\tau} \delta_{\tau}(t - nT) = \\ &= s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \delta_{\tau}(t - nT) = s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta(t - nT), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta(t - nT)$ – смещенная на nT дельта-функция Дирака; T – временной интервал следования дельта-функции.

В результате математического моделирования формируемого дискретного сигнала датчика получено соотношение в виде произведения исходного аналогового сигнала на бесконечную сумму смещенных дельта-функций Дирака:

$$s_{\Delta}(t) = s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta(t - nT). \quad (4)$$

Для получения численных значений $s_{\Delta}(t)$ дискретный сигнал необходимо проинтегрировать в пределах $t_n = nT$:

$$s_{\Delta}(t_n) = \int_{nT-\varepsilon}^{nT+\varepsilon} s(t) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta(t - nT) dt, \quad (5)$$

где $\varepsilon < T$ – конечный интервал интегрирования дискретного сигнала в окрестностях $t_n = nT$.

Данная модель дискретного сигнала (Рис. 2) используется для перехода от аналоговых сигналов к цифровым.

Процедуры цифровой обработки данных обеспечивают минимальную погрешность, высокую точность выходных данных, учет влияния помех и функциональную гибкость программно-аппаратной (микропроцессорной) реализации.

Основными функциями представленной разработки НВЦ БТ РГУПС являются прием сигнала, поступающего от магнитоиндукционного датчика счета осей на микропроцессорное устройство аналого-цифрового преобразования (блок формирования и передачи сигнала), анализ значений, получаемых в массивах данных, и формирование оценки состояния проходящего колеса, определение скорости движения состава, счет количества прошедших колесных пар и вагонов.

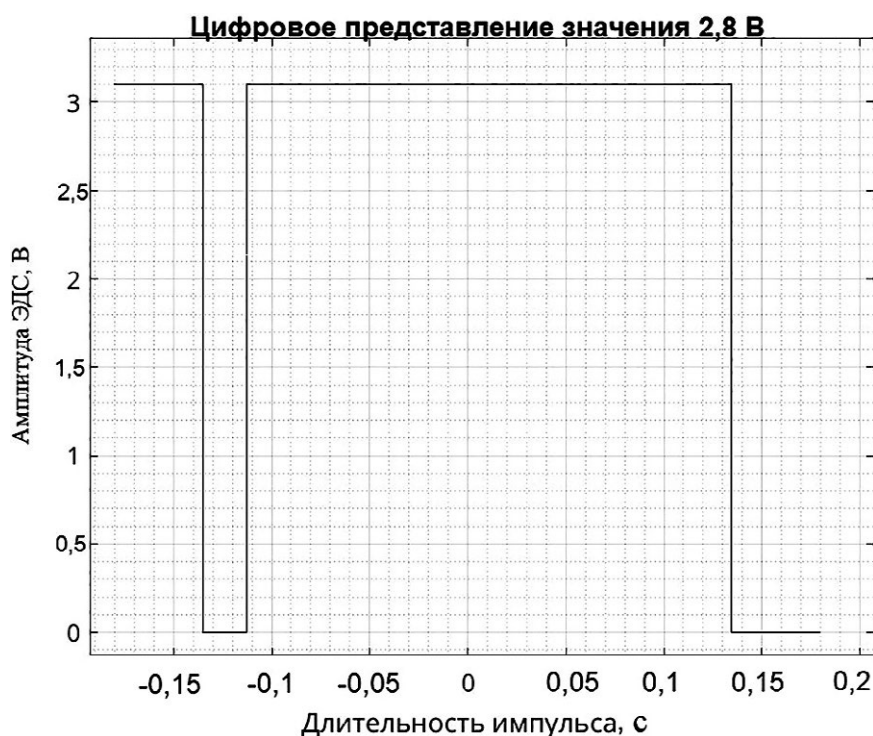


Рис. 2. Представление цифрового значения сигнала $\Pi\tau$, соответствующего значению 2,8 В аналогового сигнала $s(t)$ (Рис. 1)

Fig. 2. Representation of the digital value of the $\Pi\tau$ signal corresponding to the 2.8 V value of the analog signal $s(t)$ (Fig. 1)

БЛОК ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА И ПРИНЦИП ЕГО РАБОТЫ

Внутри корпуса БФС смонтирован микроконтроллер со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), имеющий вход для сигнала от магнитоиндукционного датчика счета осей железнодорожного состава. Микроконтроллер с аналого-цифровым преобразователем соединен с приемопередатчиком. Внутри корпуса БФС установлен блок питания, соединенный с микроконтроллером и приемопередатчиком. Блок формирования сигналов, выполняет функции преобразования поступающего от магнитоиндукционного датчика (ШМП12, ДМ12) аналогового сигнала в цифровой для его анализа и последующей передачи.

Блок преобразования и передачи сигнала, поступающего от магнитоиндукционного датчика счета осей железнодорожного состава, работает следующим образом: первичный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера (ADC-преобразователь),

далее цифровой сигнал передается на вход приемопередатчика со схемой, реализующей интерфейс RS-485, а уже затем с приемопередатчика данные передаются на персональный компьютер для дальнейшего анализа.

Для формирования всего массива данных, получаемых блоком формирования сигналов, рассмотрим аналоговый сигнал (Рис. 3), полученный при проходе колеса над магнитоиндукционным датчиком ШМП12.

Данный сигнал характеризуется 18 массивами (Табл. 1), которые были получены в результате аналого-цифрового преобразования.

При обработке поступающих данных о количестве осей и счете вагонов важно определить, были ли значения получены в результате прохода колеса, или они являются результатом постороннего шума. Устройство БФС с момента включения осуществляет непрерывное дискретное преобразование, которое представлено конечным числом отсчетов. Результаты преобразований хранятся в массиве из 20 значений;

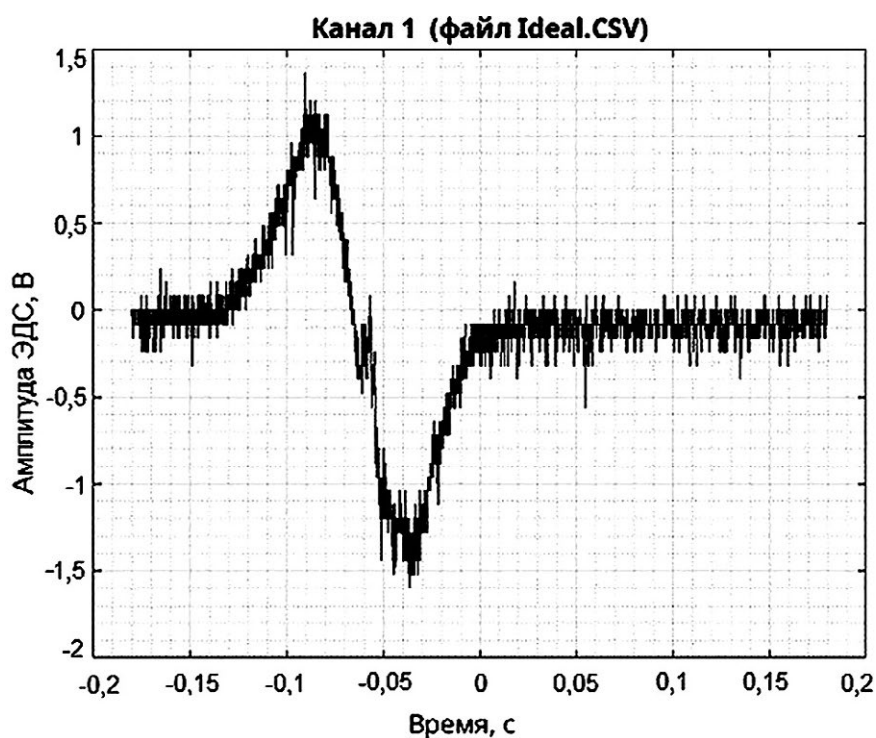


Рис. 3. Стандартный сигнал, получаемый при проходе колеса над магнитоиндукционным датчиком, содержащий паразитный шум (колесо без изъянов)

Fig. 3. The standard signal received when the wheel passes over the magnetoinduction sensor, containing spurious noise (the wheel is without flaws)

Таблица 1. Массивы дискретных значений, характеризующие аналоговый сигнал**Table 1.** Arrays of discrete values characterizing the analog signal

Time	Value
2024-08-07 13:32:44.864262	[1, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2]
2024-08-07 13:32:44.876861	[2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 4, 3, 4, 5, 5, 5, 6, 7, 7, 7, 6, 7, 7]
2024-08-07 13:32:44.889998	[6, 7, 7, 7, 6, 7, 7, 7, 8, 7, 7, 8, 8, 9, 11, 11, 10, 11, 11, 12]
2024-08-07 13:32:44.902592	[9, 11, 11, 10, 11, 11, 12, 13, 13, 13, 14, 13, 15, 14, 15, 16, 16, 16, 17, 18]
2024-08-07 13:32:44.915676	[14, 15, 16, 16, 16, 17, 18, 18, 20, 21, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 27, 30]
2024-08-07 13:32:44.928634	[24, 25, 26, 27, 28, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 40, 42, 46, 46, 48, 50, 52]
2024-08-07 13:32:44.944123	[42, 46, 46, 48, 50, 52, 55, 58, 60, 62, 64, 65, 68, 73, 74, 78, 82, 86, 88, 91]
2024-08-07 13:32:44.957045	[74, 78, 82, 86, 88, 91, 96, 102, 106, 110, 113, 118, 123, 128, 134, 138, 142, 146, 153, 158]
2024-08-07 13:32:44.970383	[128, 134, 138, 142, 146, 153, 158, 166, 172, 177, 184, 193, 201, 208, 217, 224, 234, 241, 248, 258]
2024-08-07 13:32:44.984467	[217, 224, 234, 241, 248, 258, 268, 274, 282, 296, 308, 319, 323, 332, 347, 366, 384, 398, 407, 417]
2024-08-07 13:32:44.999836	[347, 366, 384, 398, 407, 417, 437, 462, 484, 493, 506, 523, 535, 546, 569, 593, 606, 622, 650, 679]
2024-08-07 13:32:45.013687	[606, 622, 650, 679, 698, 719, 749, 774, 792, 808, 828, 852, 878, 897, 920, 948, 975, 998, 1011, 1032]
2024-08-07 13:32:45.026467	[897, 920, 948, 975, 998, 1011, 1032, 1056, 1076, 1100, 1126, 1141, 1162, 1182, 1195, 1215, 1249, 1253, 1253, 1253]
2024-08-07 13:32:45.039031	[1162, 1182, 1195, 1215, 1249, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253]
2024-08-07 13:32:45.052446	[1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1253, 1247, 1215, 1218, 1212, 1181, 1128, 1077]
2024-08-07 13:32:45.068047	[1218, 1212, 1181, 1128, 1077, 1074, 1062, 1017, 1011, 1036, 1001, 900, 856, 881, 842, 736, 674, 682, 657, 590]
2024-08-07 13:32:45.081447	[842, 736, 674, 682, 657, 590, 554, 508, 444, 397, 343, 311, 283, 191, 111, 83, 27, 0, 0, 0]
2024-08-07 13:32:45.094476	[111, 83, 27, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

для отсеивания посторонних сигналов применяется программный фильтр, написанный на языке Python [9], который анализирует информацию и определяет, были ли данные получены в результате движения колес, или они являются следствием постороннего шума. Ниже приведены программа фильтра и логика его работы.

```
def parasiticConversionChecker(signalData: list[int]) -> int:
```

```
    PARASITIC_CONVERSION_VALUE = 100
```

```
    oneMoreCounter: int = 0
```

```
    for arg in signalData:
```

```
        if(arg > PARASITIC_CONVERSION_VALUE):
```

```
            oneMoreCounter += 1
```

```
        break
```

```
    return oneMoreCounter
```

В данном случае **def parasitic Conversion Checker (signal Data: list[int]) -> int:** – это средство проверки паразитного преобразования (данные сигнала: список [int]) -> int:), а **return one More Counter** – обнуление счетчика.

Аналого-цифровой преобразователь БФС регистрирует всплеск, который соответствует последовательности значений [12, 0, 0, 40, 20, 35, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 18, 0, ... 0] [10]. Программно установленный параметр отсеивания лишних значений **PARASITIC_CONVERSION_VALUE = 100** (установлен на значение 100) определяет минимальные значения для элементов массива и преобразует их в целое число. Все значения меньше 100 являются шумами и отсеиваются. После выполненной предварительной обработки отсеивания шумов будут подготовлены данные для последующей работы (Табл. 1).

Опираясь на эти данные, можно определить скорость колеса:

$I_{\text{arr}} = 18$ (количество массивов, полученных в результате преобразования аналогового сигнала, получаемого от магнитоиндукционного датчика);

$t_{\text{imp}} = 360 \text{ мс} = 0,36 \text{ с}$ (длительность импульса сигнала);

$S_{\text{rad}} = 421 \text{ мм}$ (расстояние, которое проходит условная точка колеса над головкой датчика).

Для определения скорости колеса непрерывным преобразованием Фурье [11] рассчитывают время прохода колеса над датчиком; данные получают с учетом количества значений внутри массива. После проведения преобразований получаем скорость прохода колеса над датчиком $V_{\text{el}} = 4,2 \text{ км/ч}$ (Рис. 3).

Для определения скорости состава с помощью MATLAB обрабатывается свыше 1000 массивов значений.

Ниже представлен код на языке Python [12], который реализует описанную ранее логику определения скорости

```
result: str = None
for element in range(counter, len(self.__signalArguments)):
    if(sel.__signalArguments[element] == 0):
        result = "Wheel has no defects" (колесо не имеет дефекта)
        break
return result speed wheel Data) - 4,2 км/ч
```

В данном случае **return result speed wheel Data) – 4,2 км/ч** – определяемая программой скорость колеса.

ПРОГРАММНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОЛЕС ТЕЛЕЖКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

Рассмотрим алгоритмы оценки состояния колес тележки железнодорожного вагона, реализованные на программном уровне. По графику сигнала (Рис. 4) можно сказать, что кратковременный импульсный всплеск, полученный на пике сигнала в области как положительных (временной интервал от $-0,1$ до $-0,07840$ мс), так и отрицательных (от $-0,07$ до $-0,05$ мс) значений, характеризует момент фиксирования дефекта на гребне проходящего колеса. При фиксировании дефекта колеса аналоговый сигнал, поступающий от магнитоиндукционного датчика, имеет дополнительную амплитуду, полученную в момент прохождения дефектного участка колеса.

При выполнении аналого-цифрового преобразования в результирующей последовательности целочисленных значений повторяемая серия импульсов сигнала будет характеризоваться самими значениями. Данную корреляцию можно установить алгоритмом сравнения, работающим по логике «если текущее значение больше следующего, то условие выполнено верно (true), если меньше, то условие не выполнено (false)», где «верно» (true) – логический 0, а «не выполнено» (false) – логическая единица.

Данный алгоритм сравнения показывает наличие или отсутствие повторяющейся серии импульсов. Получаемых значений довольно много, каждый массив значений имеет свой временной интервал. Для упрощения работы со значениями была выполнена операция усреднения по каждому массиву прямым дискретным по времени преобразованием Фурье.

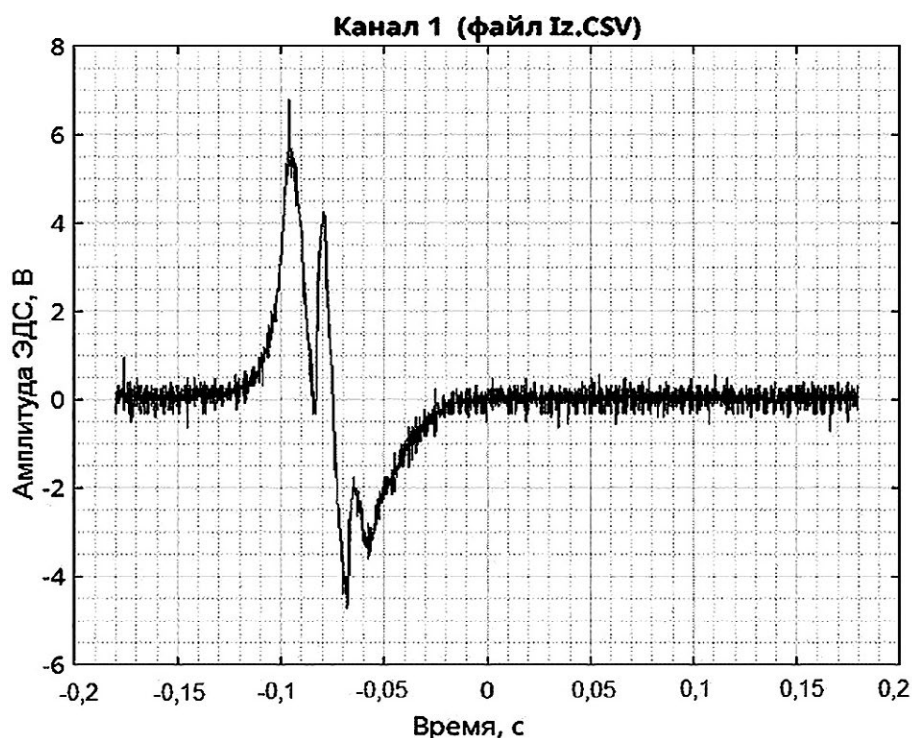


Рис. 4. Сигнал при проходе колеса с изъяном над магнитоиндукционным датчиком, зафиксированный в лабораторных условиях

Fig. 4. The signal during the passage of a wheel with a flaw above the magnetoinduction sensor, recorded in the laboratory

В результате массивы были представлены полученными усредненными значениями [13]. В Табл. 2 записаны время и усредненные значения рассчитанного с помощью MATLAB сигнала, полученного от датчика при проходе колеса с дефектом.

Выполним в среде MATLAB последовательное сравнение данных, представленных в табл. 2, используем два массива из нескольких значений, приведенных в таблице.

$A = [131, 262, 393, 458, 917, 1310, 1572, 2031, 2358, 3669, 1900, 3931, 2555]$.

$B = [262, 393, 458, 917, 1310, 1572, 2031, 2358, 3669, 1900, 3931, 2555, 458]$.

После последовательного сравнения, характеризуемого условием $A[i] > B[i]$, получается массив из K значений [14], состоящий из 0 и 1:

$K = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1]$.

Исходя из описанной логики сравнения, по полученному массиву K можно сделать вывод, что первые нули $[0, 0, 0, <...>]$ характеризуют

Таблица 2. Усредненные дискретные значения, характеризующие сигнал от датчика при проходе колеса с изъяном

Table 2. Averaged discrete values characterizing the signal from the sensor during passage of the defective wheel

Время	Значения
2024-08-12 13:10:25.133023	2,05
2024-08-12 13:10:25.146020	2,85
2024-08-12 13:10:25.158561	4,7
2024-08-12 13:10:25.171318	8,35
2024-08-12 13:10:25.184731	15,6
2024-08-12 13:10:25.197408	28,75
2024-08-12 13:10:25.210158	56,0
2024-08-12 13:10:25.224262	99,75
2024-08-12 13:10:25.237749	220,05
2024-08-12 13:10:25.250995	322,75
2024-08-12 13:10:25.263986	280,8
2024-08-12 13:10:25.276865	155,15
2024-08-12 13:10:25.290760	79,15
2024-08-12 13:10:25.303872	234,6
2024-08-12 13:10:25.317770	123,7

момент нарастания получаемого от магнитоиндукционного датчика сигнала; последующие единицы [$\langle \dots \rangle$ 0, 1, 1, 1, $\langle \dots \rangle$] характеризуют момент спада сигнала.

Для сигнала, получаемого при проходе колесной пары без дефектов, наблюдался бы только этот ряд значений: [0, 0, 0, 1, 1, 1]. Следует обратить внимание, что в данном случае после момента спада первой полуамплитуды получаемого сигнала наблюдается резкий подъем, выраженный нулем [1, 1, 0, 1, 1], за которым следует ряд единиц, отражающих спад. Эти импульсные всплески повторяются многократно и отражают дефект на колесе.

Ниже приведен пример кода на языке Python для анализа полученных значений и реализации алгоритма программы определения изъяна на гребне колеса.

```

self.__signalArguments = DefectAnalysis.
trendAssessment(DefectAnalysis.getMiddle(signalArguments))
Анализ дефекта
def difectDetection(self) -> str:

```

```
counter: int = 0
while(counter < len(self.__signalArguments)):
if(self.__signalArguments[counter] == 1):
break
counter += 1

result: str = None
for element in range(counter, len(self.__signalArguments)):
if(self.__signalArguments[element] == 0):
result = "Wheel has no defects"колесо не имеет дефект
break else:следующее колесо
result = "Wheel has a defect"( результат = "Колесо имеет дефект")

return result
```

Приведенный код написан в рамках объектно ориентированной парадигмы (ООП), поэтому в качестве основных логических структурных элементов в программе используются объекты, а не алгоритмы [15].

В нашем случае метод создания объекта класса анализируемых дефектов (Defect Analysis) принимает два аргумента, которые сохраняются в качестве переменных данных памяти после инициализации поля памяти аргумента сигнала (self. __signal Arguments); как указано в аннотации к типу модуля Python [9], это поле памяти принимает значение массива, который хранит последовательность элементов с целыми значениями. В качестве аргумента передаваемого конструктору класса анализируемых дефектов (Defect Analysis) должен быть передан общий массив значений из таблицы (см. табл. 1), столбец «Значение».

Создание экземпляра класса анализируемых дефектов (Defect Analysis) было выполнено методом классификации средних значений (get Middle); в процессе был получен новый массив, содержащий средние значения для каждого из значений, вложенных в общий массив. Полученные средние значения приведены в Табл. 2, столбец «Значение». Результирующие значения передаются в качестве аргумента вызываемому методу класса оценки тренда (trend Assessment), в ходе которого с помощью алгоритма последовательного сравнения будет получена последовательность значений 0 и 1, которые включаются

в новый сгенерированный массив К. После создания экземпляра класса можно будет вызвать метод обнаружения различий (defect Detection), который реализует логику анализа массива К. Результатом работы этого метода будет строка «колесо без дефекта» (Wheel has no defects), которая означает, что колесо не имеет дефектов. Если в результате анализа будет установлено, что колесо имеет дефекты, то метод выделит строку Wheel has a defect.

Этот программный метод, реализуемый на устройстве блока формирования сигналов, позволил создать устройство преобразования сигналов с уникальными данными и дал возможность таким устройствам контролировать скорость проходящего состава и определять дефекты на гребнях колес вагонов во время движения.

Разработанный в НВЦ БТ РГУПС блок формирования сигналов при прохождении колеса поезда над магнитоиндукционным датчиком будет передавать на экран персонального компьютера следующий набор данных:

Place: (1361 kilometers) Tekhnikum station

Passage Status: Partly

Date: 2024-08-12 12:44:28

Wheel: 1

Defect: Wheel has no defects

Carriage: 1

Speed: 16.81 k/h

[Место: (1361 километр) Станция Техникум (СКЖД)

Статус проезда: Участник

Дата: 2024-08-12 12:44:28

Колесо: 1

Дефект: Колесо не имеет дефектов

Вагон: 1

Скорость: 16,81 км/ч]

Именно так на программном уровне реализуется алгоритм оценки состояния ходовой части подвижного состава, счет количества осей и вагонов системой, включающей усовершенствованные магнитоиндукционные датчики и блок формирования сигналов.

ВЫВОДЫ

Разработанная инновационная система счета осей и диагностики колесных пар подвижного состава, включающая помехоустойчивые магнитоиндукционные датчики и микропроцессорные блоки формирования сигналов, для которых разработаны программы, декодирующие сигнал, обладает повышенной эффективностью и точностью диагностики.

Представленная система способна надежно работать в условиях Крайнего Севера и Дальнего Востока и обеспечивает при высокоскоростном движении счет осей, числа вагонов, определение скорости движения, фиксацию времени прохода участка пути и определение места входа состава, а также контролирует занятость участка пути.

Предложенные и исследованные новые технико-технологические решения повышают эффективность управления высокоскоростным движением и позволяют повысить объемы пассажирских и грузовых перевозок железнодорожным транспортом за счет дополнительного функционала: самодиагностики системы, протоколирования прохода поездов, пакета компьютерных программ при работе с устройством БФС. Система реализуется на базе отечественных комплектующих и программно-аппаратных средств и может быть использована на всей сети железных дорог России. В настоящее время проходят эксплуатационные испытания опытных устройств БФС с усовершенствованными, более надежными магнитоиндукционными датчиками в одном из территориальных филиалов ОАО «РЖД» – на Северо-Кавказской железной дороге.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Ростовского государственного университета путей сообщения.

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. Перспективы датчиков колес и систем счета осей. Часть I // Железные дороги мира. 2012. № 6. С. 51–57. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: <https://zdmira.com/archive/2012/06#grid-item10>. EDN: OXWBPT
2. Мишарин А.С. Высокоскоростные магистрали – артерии российского гигаполиса // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 2–3 (63–64). С. 7–10. EDN: WDJQDL
3. Петров К.С., Кондратенко Е.В., Петров В.В. Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 585–596. doi: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596
4. Шаповалова Ю.В., Пустовой Ю.Е., Эгизян А.А., Швалов Д.В. Моделирование неисправностей магнитоиндукционных датчиков счета осей. В кн.: Труды II Международной научно-практической конференции «Цифровые инфокоммуникационные технологии», 16 декабря 2022 года, Ростов-на-Дону. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. С. 279–283. doi: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_279
5. Соломин В.А., Штанке В.В. Инновации в диагностике колесных пар подвижного состава путевыми магнитоиндукционными датчиками // Вестник Института проблем естественных монополий. Техника железных дорог. 2024. № 1 (65). С. 32–37. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: <https://techzd.ru/upload/iblock/979/5o516xkgngljzuphkt5rwuqcg0dsj8.pdf>
6. Патент РФ на изобретение № 2808857 / 05.12.23. Бюл. № 35. Штанке В.В. Способ диагностики технического состояния колесных пар и тележек железнодорожных вагонов. EDN: OHIURW
7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
8. Бочарова А.А., Зайко Н.Ю. Математические основы обработки сигналов. Владивосток: ДВФУ, 2022. ISBN: 978-5-7444-5296-4. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/246/db03o89u2c5u83hyw980qzxdwrdo97k3/Bocharova_A.A.,_Zajko_N.YU._Matematicheskie_osnovy_obrabotki_signalov.pdf?ysclid=m6ot9z42sr584452943
9. Яворски М., Зиате Т. Python. Лучшие практики и инструменты Expert Python Programming. СПб.: Питер, 2024. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: <https://library.cbr.ru/catalog/lib/books/955391/?ysclid=m6otr999ej299552641>
10. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. СПб.: Питер, 2024.
11. Фрик П.Г. Обработка и анализ сигналов и изображений в физических экспериментах. Пермь: ПГНИУ, 2023. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Frik-Obrabotka-i-analiz-signalov-i-izobrazhenij-v-fizicheskikh-eksperimentah.pdf>
12. Саммерфилд М. Программирование на Python 3. Подробное руководство. СПб., М.: Символ Плюс, 2009.

13. Коберниченко В.Г. Основы цифровой обработки сигналов. Екатеринбург: УрФУ, 2018. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/65261/1/978-5-7996-2464-4_2018.pdf?ysclid=m6ous3q1dx398458934
14. Ревинская О.Г. Основы обработки данных в среде MatLab 2013 Часть 1. Томск: ТомГУ, 2015. Дата обращения: 20.01.2025. Режим доступа: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000521578/SOURCE1>
15. Толмачев Д.Е., Тарасьев А.А., Турыгина В.Ф. Методы объектно-ориентированного анализа и программирования в управлении экономическими системами. Екатеринбург: УрФУ, 2023. EDN: AXITIF

REFERENCES

1. Perspectives of wheel sensors and axle counting systems. Part I. *Zheleznye dorogi mira*. 2012;(6):51–57. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: <https://zdmira.com/archive/2012/06#grid-item10> EDN: OXWBPT
2. Misharin AS. High-speed railways as the traffic arteries of a Russian gigametropolis. *Transport of the Russian Federation*. 2016;2-3(63–64):7–10. (In Russ.) EDN: WDJQDL
3. Petrov KS, Kondratenko EV, Petrov VV. Development of a system of magnetic induction sensors for diagnosing wear of the rolling stock wheelset crest. *Journal of Instrument Engineering*. 2022;65(8):585–596. (In Russ.) doi: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-585-596
4. Shapovalova YuV, Pustovoi YuE, Egizian AA, Shvalov DV. Fault modelling magneto-inductive axis counting sensors. In: *Proceedings of the 2nd International Scientific-Practical Conference “Digital infocommunication technologies”, 2022 Dec 16. Rostov-on-Don*. Rostov-on-Don: RSTU; 2022:279–283. (In Russ.) doi: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_279
5. Solomin V, Shtanke V. Innovations in diagnostics of wheel pairs of rolling stock by track magnetic induction sensors. *Railway Equipment*. 2024;(1)65:32–37. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: <https://techzd.ru/upload/iblock/979/5o516xkgngljzuphkqt5rwuqcg0dsj8.pdf>
6. Patent RUS №2808857/ 05.12.23. Byul. № 35. Shtanke V. Method for diagnosing the technical condition of wheel pairs and bogies of railway cars. (In Russ.) EDN: OHIURW
7. Sergienko AB. *Digital signal processing*. 3rd ed. Saint Petersburg: BHV-Peterburg; 2011. (In Russ.)
8. Bocharova AA, Zajko NJu. *Mathematical foundations of signal processing*. Vladivostok: DVFU; 2022. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/246/db03o89u2c5u83hyw980qzxdwrdo97k3/Bocharova_A.A.,_Zajko_N.YU._Matematicheskie_osnovy_obrabotki_signalov.pdf?ysclid=m6ot9z42sr584452943
9. Javorski M, Ziade T. Python. *Best Practices and Tools Expert Python Programming*. Saint Petersburg: Piter; 2024. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: <https://library.cbr.ru/catalog/lib/books/955391/?ysclid=m6otr999ej299552641>

10. Lafore R. Object-oriented programming in C++. Saint Petersburg: Piter; 2022. (In Russ.)
11. Frik PG. *Processing and analysis of signals and images in physical experiments*. Perm': PSSRU; 2023. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Frik-Obrabotka-i-analiz-signalov-i-izobrazhenij-v-fizicheskikh-eksperimentah.pdf>
12. Sammerfeld M. *Programming in Python 3. Detailed guide*. Saint Petersburg, Moscow: Simvol Pljus; 2009. (In Russ.) Available from: http://uchcom7.botik.ru/L/prog/python/python_08.pdf Accessed: 20.01.2025.
13. Kobernichenko VG. *Fundamentals of Digital Signal Processing*. Ekaterinburg: UrFU, 2018. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/65261/1/978-5-7996-2464-4_2018.pdf?ysclid=m6ous3q1dx398458934
14. Revinskaja OG. *Fundamentals of data processing in the MatLab 2013 environment*. Part 1. Tomsk: TomSU; 2015. (In Russ.) Accessed: 20.01.2025. Available from: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000521578/SOURCE1>
15. Tolmachev DE, Tarasev AA, Turygina VF. *Methods of object-oriented analysis and programming in the management of economic systems*. Ekaterinburg: UrFU; 2023. (In Russ.) EDN: AXITIF

Сведения об авторах:

Штанке Вероника Валерьевна, начальник научно-внедренческого центра «Безопасность транспорта»;
eLibrary SPIN: 4745-3051; ORCID: 0000-0002-7145-5999;
E-mail: arnold.shtanke@yandex.ru

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;
E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Information about the authors:

Veronika V. Shtanke, Head of the Scientific and Innovation Center Transport Safety;
eLibrary SPIN: 4745-3051; ORCID: 0000-0002-7145-5999;
E-mail: arnold.shtanke@yandex.ru

Vladimir A. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;
E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;
E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

<https://doi.org/10.17816/transsyst642083>

© А.В. Сугоровский, Ан.В. Сугоровский

Российский университет транспорта

(Москва, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ЦЕНТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ ПОЛИГОННОГО УРОВНЯ

Цель. Решить задачу определения целесообразности размещения в том или ином городе центра управления перевозками полигонного уровня.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использованы методы имитационного моделирования, статистического, логического, проектного анализа, метод теоретического анализа, обобщения и формализации.

Результаты. Разработана методика проведения рейтинговой оценки городов для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня, проведено исследование, расчет и анализ значимых факторов, укрупненных показателей и входящих в их состав показателей, при различных вариантах значений весовых коэффициентов. Приведены результаты моделирования размещения центров управления перевозками полигонного уровня для городов Восточного полигона.

Заключение. Разработанная методика и результаты выполненных исследований позволяют решить задачу определения целесообразности размещения в том или ином городе центра управления перевозками полигонного уровня.

Ключевые слова: эксплуатационные факторы; социальные факторы; факторы производства; рейтинговая оценка городов; технологический полигон; Восточный полигон, полигонные технологии.

Как цитировать:

Сугоровский А.В., Сугоровский Ан.В. Моделирование территориального расположения диспетчерских центров управления перевозками полигонного уровня // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 98–114. doi: 10.17816/transsyst642083

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

© A.V. Sugorovsky, An.V. Sugorovsky

Russian University of Transport

(Moscow, Russia)

SIMULATION OF SETTING UP OF OPERATING TERRITORY TRANSPORTATION CONTROL CENTERS BASED ON TERRITORIAL CHARACTERISTICS

Aim. To solve a problem of assessing of the feasibility of setting up of an operating territory transportation control center in a city.

Materials and methods. The work employed simulation modeling, statistical, logical, design analysis, theoretical analysis, generalization, and formalization.

Results. We developed a rating methodology for cities to determine the feasibility of setting up operating territory transportation control centers. We studied, calculated and analyzed significant factors, aggregated indicators, and indicators included therein, with various options for the values of weight factors. We present the results of simulation of setting up of operating territory transportation control centers for the cities of the Eastern Operating Territory.

Conclusion. The methodology and the results obtained addresses the problem of assessing the feasibility of setting up of an operating territory transportation control center in a city.

Keywords: operational factors; social factors; factors of production; city ratings; technological operating territory; Eastern Operating Territory; operating territory technologies.

To cite this article:

Sugorovsky AV, Sugorovsky AnV. Simulation of setting up of operating territory transportation control centers based on territorial characteristics. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):98–114. doi: 10.17816/transsyst642083

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 создание, развитие и внедрение сквозных полигонных технологий в организацию и управление перевозочным процессом, в условиях исчерпывающихся пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта, позволит повысить уровень устойчивости системы железнодорожных перевозок [1].

В настоящее время проводится большая работа для создания условий обеспечения сквозных технологий в планировании, организации эксплуатационной работой и управлении перевозочным процессом на сети железных дорог, для совершенствования организации процесса и оценки объемов зарождаемых и распределяемых грузопотоков на транспортных полигонах. В новой инструкции по оперативному планированию поездной и грузовой работы особое внимание уделено сменно-суточному и текущему планированию, корректировке и изменению плана эксплуатационной работы на полигонном уровне, в настоящее время выполняется на Восточном полигоне в границах Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорог [2].

Вопросам развития технологических полигонов железнодорожной сети, созданию условий для обеспечения сквозных технологий в планировании и текущей организации эксплуатационной работы и управлении перевозочным процессом на сети железных дорог, устойчивому развитию транспортных систем, совершенствованию процесса распределения грузопотоков на транспортном полигоне и узле, в том числе, при организации мультимодальных, пассажирских и контейнерных перевозок, внедрению полигонных технологий на основе сквозных принципов при обосновании экономической эффективности организации регулирования и управления тяговыми ресурсами на сети железных дорог России, определению пропускной способности при переходе на полигонные технологии управления процессом перевозок и укрупнении структурных подразделений ОАО «РЖД», в условиях исчерпывающейся пропускной и провозной способностей, при эксплуатации различных систем интервального регулирования движением поездов, цифровизации и оптимального размещения на сети объектов управления, транспортно-логистической инфраструктуры, посвящены многочисленные теоретические исследования [3–14].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения расчета, определяющего целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в зависимости от решающих факторов, разработана Методика проведения рейтинговой оценки городов для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня (далее – Методика).

Согласно Методике, рейтинговая оценка городов предусматривает следующие этапы:

- 1) Расчет (определение) числового значения показателя (${}^i_n \times \check{Q}$).

В общем случае числовое значения показателя определяется исходя из фактического значения i -го показателя n -го города.

- 2) Присвоение балла (${}^i_n \hat{A}$) каждому городу на основе числового значения показателя (${}^i_n \times \check{Q}$) по каждому ключевому показателю.
- 3) Расчет балловой оценки i -го показателя n -го города определяется по формуле:

$${}^i_n \hat{A} \times \check{Q} = {}^i_n \hat{A} \cdot \hat{A}^i \quad (1)$$

где ${}^i_n \hat{A} \times \check{Q}$ – балловая оценка i -го показателя n -го города; ${}^i_n \hat{A}$ – балл i -го показателя n -го города по числовому значению показателя; $\hat{A}^i$ – весовой коэффициент i -го показателя.

- 4) Расчет балловой оценки n -ого города определяется по формуле:

$$\hat{A}_n = \sum_{i=1}^{33} {}^i_n \hat{A} \times \check{Q} \quad (2)$$

где $\hat{A}_n$ – итоговая балловая оценка n -го города; ${}^i_n \hat{A} \times \check{Q}$ – балловая оценка i -го показателя n -го города.

- 5) Определение рейтинга города (P_n) по итоговой балловой оценке ($\hat{A}_n$) в порядке убывания.

При расчетах на каждом этапе значения показателей, коэффициентов на их основе и баллов округляются до тысячных по правилам округления чисел в десятичной системе исчисления.

При проведении рейтинговой оценки городов проведен анализ значимых факторов, укрупненных показателей и показателей определения целесообразности размещения в исследуемых городах центров управления перевозками полигонного уровня.

Для укрупненных показателей балловой оценкой является суммарное значение балловых оценок (${}_n^i \hat{A}^i \times \check{Q}$) входящих в их состав показателей. Присвоение балла (${}_n^i \hat{A}^i$) осуществляется в соответствии с Методикой на основе ${}_n^i \times \check{Q}$, результаты ранжируются в порядке числовых значений показателя.

В рамках данного исследования ${}_n^i \times \check{Q}$ определены для городов, в которых расположены диспетчерские центры управления перевозками дирекции управления движением (ДЦУП).

В качестве примера расчетов и моделирования, в работе показаны результаты при назначении значимым факторам соответствующего удельного веса при двух вариантах весовых коэффициентов.

При анализе Социального фактора для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня в соответствии с Методикой проведен анализ составляющих укрупненных показателей и входящих в их состав показателей.

Весовой коэффициент ($\hat{A}^i$) для Социального фактора, определяющего целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в исследуемых городах, весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) укрупненных показателей и расчетных показателей приведены для двух вариантов в Табл. 1.

Для показателей Среднемесячная заработная плата работников ведущих профессий Д (всего по дирекции) принято числовое значение (${}_n^i \times \check{Q}$) заработной платы всего по Дирекции.

Для расчета показателей Реальная среднемесячная заработная плата по субъектам РФ и Величина прожиточного минимума по субъектам РФ приняты данные с официального сайта Федеральной службы государственной статистики (Росстат).

Наилучшим числовым значением (${}_n^i \times \check{Q}$) показателей Среднемесячная заработная плата работников ведущих профессий Д (всего по дирекции) и Реальная среднемесячная заработная плата по субъектам РФ является наибольшее их значение. Для показателя Величина прожиточного минимума по субъектам РФ наилучшим числовым значением (${}_n^i \times \check{Q}$) является наименьшее значение.

В ходе расчетов укрупненного показателя Доступность жилья произведено исследование коэффициента доступности жилья по субъектам Российской Федерации, средней ставки аренды и количество строящихся застройщиками жилых домов по регионам Российской Федерации. Данные о средней ставке аренды квартиры согласно официальной

Таблица 1. Весовые коэффициенты для анализа Социального фактора

Table 1. Weighting factors for the analysis of the Social factor

Решающий фактор	Весовой коэффициент (B^i)		Укрупненный показатель	Весовой коэффициент (B^i)		Значимый показатель	Весовой коэффициент (B^i)	
	вариант			вариант			вариант	
	I	II		I	II		I	II
Социальный	0,3	0,25	Уровень материального благополучия	0,1	0,08	Среднемесячная заработная плата работников Д	0,05	0,04
						Реальная среднемесячная заработная плата по субъектам РФ	0,04	0,03
						Величина прожиточного минимума по субъектам РФ	0,01	0,01
			Доступность жилья	0,1	0,08	Коэффициент доступности жилья	0,04	0,03
						Средняя ставка аренды	0,03	0,03
						Количество строящихся жилых домов по регионам РФ	0,03	0,02
			Уровень качества жизни	0,1	0,09	Индекс качества жизни	0,03	0,02
						Численность населения	0,02	0,02
						Уровень преступности	0,02	0,02
						Экологический индекс	0,01	0,01
						Продолжительность жизни	0,02	0,02

аналитике онлайн-сервиса «Циан». В результате анализа количества строящихся застройщиками жилых домов по регионам Российской Федерации приняты данные о количестве жилых единиц (квартир, блоков, апартаментов) в строящихся домах в соответствии официальным обзором подготовленным ООО «Институт развития строительной отрасли».

Наилучшим числовым значением (${}^i_n \times \vec{Q}$) показателя Количество строящихся застройщиками жилых домов по регионам РФ является наибольшее значение. Для показателей Коэффициент доступности жилья и Средняя ставка аренды наилучшим числовым значением (${}^i_n \times \vec{Q}$) является наименьшее их значение.

Индекс качества жизни принят в соответствии с результатами исследований Финансового университета при Правительстве РФ по оценке уровня качества жизни в городах Российской Федерации. Исследование показателя Уровень преступности проведено на основании официального отчета Министерства внутренних дел Российской Федерации ФКУ Главный информационно-аналитический центр: Состояние преступности

в России за январь–декабрь 2023 года, числовым значением показателя (${}^i_n \times \check{Q}$) принято количество преступлений в год. Экологический индекс принят в соответствии с официальным исследованием Общероссийской общественной организации Зеленый патруль: Национальный экологический рейтинг регионов России по итогам зимы 2023–2024 года. В исследовании принята совокупность природоохранного индекса, социально-экологического индекса, промышленно-экологического индекса. Данные о продолжительности жизни приняты с официального сайта Федеральной службы государственной статистики (Росстат).

Наилучшим числовым значением (${}^i_n \times \check{Q}$) показателей Индекс качества жизни, Численность населения, Экологический индекс и Продолжительность жизни является наибольшее их значение. Для показателя Уровень преступности наилучшим числовым значением (${}^i_n \times \check{Q}$) является наименьшее значение.

При анализе Эксплуатационного фактора для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня согласно Методике проведен анализ составляющих укрупненных показателей и входящих в их состав показателей.

Весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) для Эксплуатационного фактора, определяющего целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в исследуемых городах, весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) укрупненных показателей и расчетных показателей приведены для двух вариантов в Табл. 2.

В ходе расчетов укрупненного показателя Объем совокупной грузовой работы Д выполнены расчеты и произведено исследование показателей: Погрузка и Грузооборот. Исследование проведено на основании фактических данных о погрузке по каждой дороге за анализируемый период (2020, 2021, 2022 и 2023 год), фактических данных о грузообороте по каждой дороге за анализируемый период (2021, 2022 и 2023 год). Для показателей Погрузка и Грузооборот числовые значения (${}^i_n \times \check{Q}$) определены в результате расчета суммарного их значения за исследуемый период. Наилучшим числовым значением показателей (${}^i_n \times \check{Q}$) Погрузка и Грузооборот является наибольшее их значение. Дороге, которая выполняет наибольший объем грузовой работы, присвоен наибольший балл (${}^i_n \hat{A}$). Для расчета укрупненного показателя Качественные показатели работы Д (анализ выполнения) проанализированы данные о рейтинговой оценке Дирекций управления движением за пять лет (2019, 2020, 2021, 2022 и 2023 год) и выполнены

Таблица 2. Весовые коэффициенты для анализа Эксплуатационного фактора**Table 2.** Weighting factors for the analysis of the Operational factor

Решающий фактор	Весовой коэффициент (B^i)		Укрупненный показатель	Весовой коэффициент (B^i)		Значимый показатель	Весовой коэффициент (B^i)	
	вариант			вариант			вариант	
	I	II		I	II		I	II
Эксплуатационный	0,4	0,5	Качественные показатели работы Д	0,15	0,17	Погрузка (факт)	0,08	0,09
						Грузооборот (факт)	0,07	0,08
						Процент выполнения погрузки	0,018	0,02
						Процент выполнения грузооборота	0,014	0,018
						Процент выполнения участковой скорости	0,018	0,02
						Процент выполнения среднесуточной производительности локомотива рабочего парка	0,018	0,02
						Доля грузовых отправок в груженных вагонах, проследовавших по инфраструктуре в установленный срок	0,018	0,02
						Процент выполнения графика движения пригородных поездов по прибытию в пункты назначения (по ответственности ЦД)	0,014	0,016
						Процент выполнения расписания движения пассажирских поездов по станциям посадки (высадки) (по ответственности ЦД)	0,014	0,016
						Уровень безопасности движения	0,018	0,02
						Удельное время задержки поездов по причине отказов в работе технических средств всех категорий и технологических	0,018	0,02
			Совокупный объем грузовой работы Д	0,15	0,17	Погрузка (факт)	0,08	0,09
						Грузооборот (факт)	0,07	0,08
			Функциональная специализация ДЦУП	0,1	0,16	Логистическое управление транзитными поездопотоками и тяговыми ресурсами в границах всего технологического полигона	0,04	0,07
						Управление вагонопотоками и организация местной работы	0,03	0,04
						Обеспечение погрузки и вывоз предъявляемых объемов перевозок	0,03	0,05

расчеты балловой оценки (${}_n^i \hat{A} \times \hat{Q}$). Исходя из цели, определяющей целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в принятых городах, для оказания помощи на местах, Дирекции управления движением, занявшей последнее место по итогу выполнения показателей за пять лет (2019, 2020, 2021, 2022 и 2023 год), присваивается наибольший балл (${}_n^i \hat{A}$). Наилучшим числовым значением показателей (${}_n^i \times \hat{Q}$) Качественные показатели работы Д (анализ выполнения) является наибольшее значение. Для расчета укрупненного показателя Функциональная специализация ДЦУП принята функциональная специализация ДЦУП в соответствии с Концепцией перспективного диспетчерского управления на сети железных дорог с применением сквозных принципов. Баллы (${}_n^i \hat{A}$) и весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) назначены в соответствии с Методикой. Городу, в котором находится ДЦУП соответствующей специализации, назначен максимальный балл (${}_n^i \hat{A}$), равный 15. Исходя из цели, определяющей целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в принятых городах, назначены соответствующие коэффициенты в зависимости от специализации ДЦУП.

При анализе Фактора производства для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня согласно Методике проведен анализ составляющих укрупненных показателей и входящих в их состав показателей.

Весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) для Фактора производства, определяющего целесообразность размещения центров управления перевозками полигонного уровня в исследуемых городах и весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) укрупненных показателей и расчетных показателей приведены для двух вариантов в Табл. 3.

В ходе расчетов укрупненного показателя Ресурсы производства произведено исследование показателей на предмет наличия Диспетчерского центра управления перевозками (ДЦУП), Центра управления перевозками на Восточном полигоне (ЦУП ВП) и Центра управления тяговыми ресурсами (ЦУТР). Выполнены расчеты балловой оценки (${}_n^i \hat{A} \times \hat{Q}$) для показателей, характеризующих наличие либо отсутствие ДЦУП, ЦУП П и ЦУТР для каждого исследуемого города. В ходе расчетов укрупненного показателя Трудовые ресурсы выполнены расчеты и произведено исследование штата региональных Дирекций управления движением (Д) и штата Диспетчерского центра управления перевозками дирекций

Таблица 3. Весовые коэффициенты для анализа Фактора производства**Table 3.** Weighting factors for the analysis of the Production factor

Решающий фактор	Весовой коэффициент (B^i)		Укрупненный показатель	Весовой коэффициент (B^i)		Значимый показатель	Весовой коэффициент (B^i)	
	вариант			вариант			вариант	
	I	II		I	II		I	II
Фактор производства	0,3	0,25	Ресурсы производства	0,15	0,09	Расположение ДЦУП	0,1	0,06
				0,08	0,08	Наличие ЦУТР	0,05	0,03
			Трудовые ресурсы	0,07	0,08	Штат Д	0,03	0,03
						Штат ДЦУП	0,05	0,05
			Уровень образования	0,15	0,09	Профильный ВУЗ/Филиал (с учетом кол-ва мест на обучение)	0,04	0,05
						Профильные ССУЗ (с учетом кол-ва мест на обучение)	0,03	0,03

управления движения. Для показателей Штат Д и Штат ДЦУП наилучшим числовым значением показателей (${}_n^i \times \vec{Q}$) является наибольшее их значение. В ходе расчетов укрупненного показателя Уровень образования выполнены расчеты и проведено комплексное исследование учебной базы в городах. По данным Министерства транспорта Российской Федерации, согласно перечню образовательных учреждений транспортного комплекса России, выделены профильные ВУЗы в исследуемых городах. Кроме того, в ходе исследования учтено наличие в городах филиалов высших учебных заведений, наличие средних специальных учебных заведений и их количество, а также количество мест на обучение по профильным специальностям. Для показателей Профильный ВУЗ/Филиал (с учетом количества мест на обучение) и Профильные ССУЗ (с учетом количества мест на обучение) за числовое значение показателей (${}_n^i \times \vec{Q}$) принято количество мест на обучение по профильным специальностям в ВУЗ и ССУЗ. Наилучшим числовым значением показателей (${}_n^i \times \vec{Q}$) является наибольшее их значение. Весовые коэффициенты ($\hat{A}^i$) для высших и средних специальных учебных приняты согласно Методике.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При расчете влияния группы Социального фактора произведено суммирование балловой оценки (${}_n^i \hat{A}^i \times \vec{Q}$) следующих укрупненных

показателей: уровень материального благополучия (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{I} \hat{A})$); доступность жилья (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{A} \hat{E})$); уровень качества жизни (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{O} \hat{E} \hat{A})$).

В качестве примера на Рис. 1 показаны результаты расчета влияния исследуемых показателей на суммарную балловую оценку Социального фактора для второго варианта значений весовых коэффициентов для городов Восточного полигона.

При расчете влияния группы Эксплуатационного фактора произведено суммирование балловой оценки (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}}$) следующих укрупненных показателей: Объем совокупной грузовой работы Д (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{I} \hat{D})$); Качественные показатели работы Д (анализ выполнения) (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{E} \hat{I})$); Функциональная специализация ДЦУП (${}^i\hat{A} \times_{\hat{Q}} (\hat{O} \hat{N})$).

Результаты расчета влияния исследуемых показателей на суммарную балловую оценку Эксплуатационного фактора для второго варианта значений весовых коэффициентов для городов Восточного полигона показаны на Рис. 2.

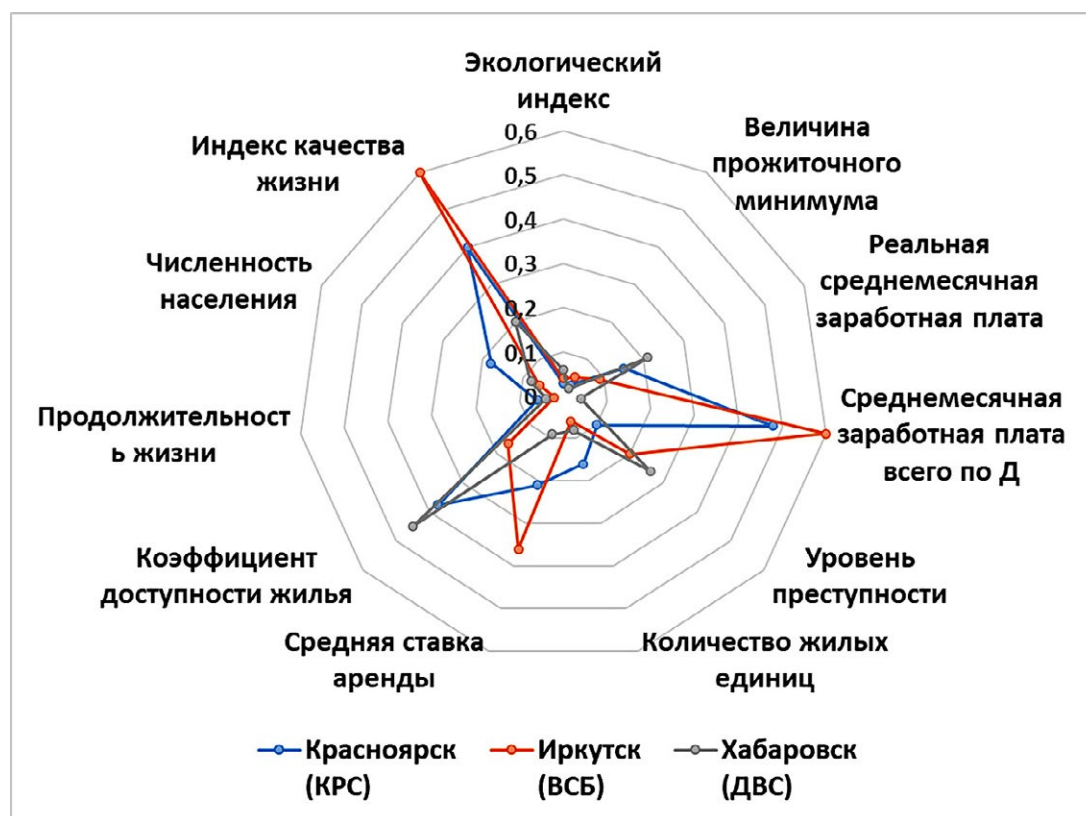


Рис. 1. Влияние показателей на суммарную балловую оценку Социального фактора

Fig 1. The influence of indicators on the total score of the Social factor

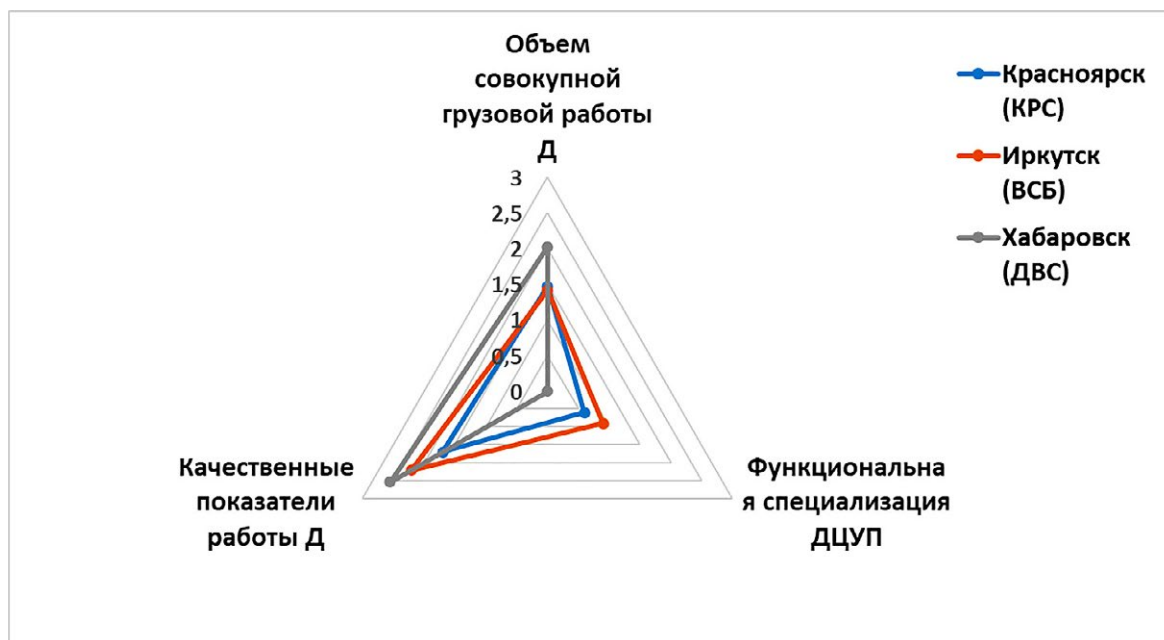


Рис. 2. Влияние показателей на суммарную балловую оценку Эксплуатационного фактора

Fig 2. The influence of indicators on the total score of the Operational factor

При расчете влияния группы Факторов производства произведено суммирование балловой оценки (${}_n^i \hat{A} \times \hat{q}$) следующих укрупненных показателей: Ресурсы производства (${}_n^i \hat{A} \times \hat{q} (\hat{D})$); Трудовые ресурсы (${}_n^i \hat{A} \times \hat{q} (\hat{O})$); Уровень образования (${}_n^i \hat{A} \times \hat{q} (\hat{O})$). Результаты расчета влияния исследуемых показателей на суммарную балловую оценку Факторов производства для второго варианта значений весовых коэффициентов для городов Восточного полигона показаны на Рис. 3.

По результатам моделирования для обоих вариантов значений весовых коэффициентов в зависимости от влияния решающих факторов для Восточного полигона рейтинг (P_n) возглавил город Иркутск (Восточно-Сибирская железная дорога) с количеством баллов более 9. Размещение центра управления перевозками полигонного уровня (ЦУП II) в этом городе наиболее целесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения задачи установления целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня в том или ином городе с учетом значимости различных аспектов деятельности ОАО «РЖД» при осуществлении логистического

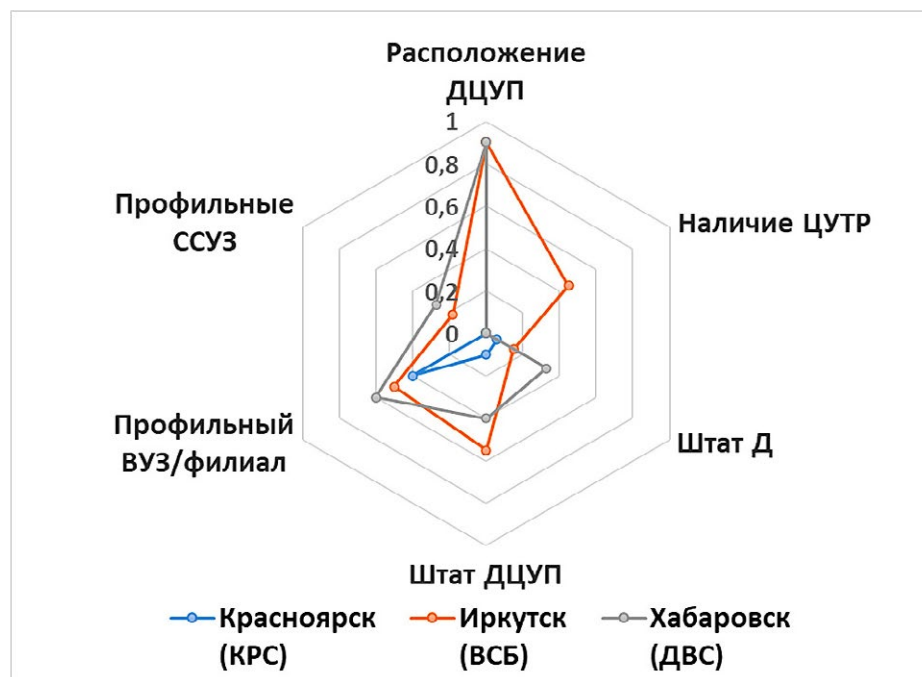


Рис. 3. Влияние показателей на суммарную балловую оценку Фактора производства

Fig 3. The influence of indicators on the total score of the Factor production

управления транзитными поездопотоками и тяговыми ресурсами в границах технологических полигонов с целью создания условий для обеспечения координации, организации эксплуатационной работы и управлении перевозочным процессом в условиях осуществления сквозных технологий, совершенствования организации и распределения грузопотоков на транспортных полигонах, разработана методика проведения рейтинговой оценки городов для определения целесообразности размещения центров управления перевозками полигонного уровня, проведены исследования, расчет и анализ значимых факторов, укрупненных показателей и входящих в их состав показателей, при различных вариантах значений весовых коэффициентов, результаты расчета влияния исследуемых показателей на суммарную балловую оценку значимых факторов, результаты моделирования размещения центров управления перевозками полигонного уровня, показывающие целесообразность с точки зрения эффективности размещение центра управления перевозками полигонного уровня.

Разработанная методика и результаты выполненных исследований позволяют решить задачу определения эффективного размещения центров управления перевозками полигонного уровня на сети железных дорог.

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. Распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 N 3363-р “Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года”. Дата обращения: 19.10.2024. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577>
2. Распоряжение ОАО “РЖД” от 09 июня 2024 N 1676-р “Об утверждении Инструкции по оперативному планированию поездной и грузовой работы в ОАО “РЖД”. Дата обращения: 19.10.2024. Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=856454>
3. Журавлева Н.А., Печкуров В.А. Анализ состояния рынка вагонов-цистерн в России и оптимизация операционных моделей компаний операторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 2. С. 97–109. doi: 10.17816/transsyst20239297-109
4. Чеченова Л.М., Волыхина Н.В. Тенденции устойчивого развития транспортных систем экомобильности // Инновационные транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7, № 4. С. 65–75. doi: 10.17816/transsyst20217465-75
5. Бородин А.Ф., Кравченко А.А., Николаев К.Ю. и др. Методы гибридной технологии имитационного моделирования при выборе вариантов реконструктивных мероприятий по развитию железнодорожных направлений и крупных узлов В кн.: Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD’2021): Труды Четырнадцатой международной конференции, Москва, 27–29 сентября 2021 года. Москва: ИПУ РАН, 2021. С. 963–971. doi: 10.25728/4783.2021.67.10.001
6. Доманов К.И., Богунов К.В. Эффективность эксплуатации электровозов ЗЭС6 на Урало-Сибирском полигоне // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 64–82. doi: 10.17816/transsyst20239164-82
7. Дмитриев Е.О. Методы обоснования вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2021. № 6. С. 26–38. EDN: CBNRNJ
8. Бородин А.Ф., Панин В.В., Рубцов Д.В., Щепанов С.Л. Развитие и интеграция информационных технологий управления перевозочным процессом при создании Цифровой Генеральной схемы развития сети ОАО «РЖД» в рамках проекта «Цифровая железная дорога» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2021. № 6. С. 5–14. EDN: ANZOWN

9. Петров А.С., Дмитриев Е.О., Николаев К.Ю. Типовые модули имитационного расчета крупных железнодорожных узлов. В кн.: Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): Материалы двенадцатой международной конференции, Москва, 01–03 октября 2019 года. Москва: МНИИПУ РАН, 2019. С. 633–644. doi 10.25728/mlsd.2019.2.0633
10. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макро моделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. Т. 3(62). С. 48–51. doi: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51
11. Козлов П.А., Вакуленко П.А., Козлова В.П. Железнодорожные узлы с позиций системного подхода // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3(83). С. 124–130. doi: 10.46973/0201-727X_2021_3_124
12. Косарев А.Б., Римская О.Н., Анохов И.В. Опережающее развитие железнодорожного транспорта с помощью цифровых технологий // Инновационные транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7, № 4. С. 90–105. doi: 10.17816/transsyst20217490-105
13. Селиванов А.В., Вашлаев И.И., Михайлов А.Г. Управление параметрами транспортной логистики в структуре консалтингового логистического центра // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8, № 2. С. 70–91. doi: 10.17816/transsyst20228270-91
14. Богачев В.А., Кравец А.С., Богачев Т.В. Математический эксперимент в логистических исследованиях мультимодальных грузоперевозок с временными и стоимостными показателями // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 108–121. doi: 10.17816/transsyst202391108-121

REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation of 27 November 2021. “On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035”. (In Russ) Accessed: 19.10.2024. Available from: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577>
2. Order of the JSCo “RZD” of 09 June 2024. “On approval of the Instruction on operational planning of train and freight work in JSCo “RZD”. (In Russ.) Accessed: 19.10.2024. Available from: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=856454>
3. Zhuravleva NA, Pechkurov VA. Analysis of the tank car market in Russia and optimization of operating models of operator companies. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):97–109. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239297-109
4. Chechenova LM, Volykhina NV. Trends for sustainable development of ecomobility transportation systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):65–75. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20217465-75
5. Borodin AF, Kravchenko AA, Nikolaev KY, et al. Metody gibridnoy tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya pri vybere variantov rekonstruktivnykh meropriyatiy po razvitiyu zheleznodorozhnykh napravleniy i krupnykh uzlov.

- In: Proceedings of the Fourteenth International Conference “Management of Large-scale Systems Development (MLSD’2021)”. 2021:963–971. (In Russ.) doi: 10.25728/4783.2021.67.10.001
6. Domanov KI, Bogunov KV. Operating efficiency of 3ES6 electric locomotives at the Ural-Siberian polygon. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):64–82. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20239164-82
 7. Dmitriev EO. Substantiation methods of alternative technological modes of railway network polygons operation. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:26–38. (In Russ.) EDN: CBNRNJ
 8. Borodin AF, Panin VV, Rubtsov DV, Shchipanov SL. Development and integration of information technologies for managing transportation process of the digital railway project in creating the digital master scheme for Russian railways network development. *Byulleten uchenogo soveta JSC IETD*. 2021;6:5–14. (In Russ.) EDN: ANZOWN
 9. Petrov AS, Dmitriev EO, Nikolaev KY. Tipovyye moduli imitatsionnogo rascheta krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov. In: *Proceedings of the Twelfth International Conference Managing the Development of Large-scale Systems (MLSD’2019)*. 2019:633–644. (In Russ.) doi: 10.25728/mlsd.2019.2.0633
 10. Kolokolnikov VS, Slobodyanyuk IG. Technology of polygons macromodelling. *Transport of the Urals*. 2019;3(62):48–51. (In Russ.) doi: 10.20291/1815-9400-2019-3-48-51
 11. Kozlov PA, Vakulenko SP, Kozlova VP. Railway junctions from the standpoint of a systematic approach. *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. 2021;3(83):124–130. (In Russ.) doi: 10.46973/0201-727X_2021_3_124
 12. Kosarev AB, Rimskaya ON, Anokhov IV. Advancing the development of railway transport with the help of digital technologies. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(4):90–105. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20217490-105
 13. Selivanov AV, Vashlaev II, Mikhaylov AG. Management of transport logistics parameters in the structure of the logistics consulting center. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(2):70–91. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst20228270-91
 14. Bogachev VA, Kravets AS, Bogachev TV. Mathematical experiment in logistics research of multimodal freight transportation with time and cost indicators. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):108–121. (In Russ.) doi: 10.17816/transsyst202391108-121

Сведения об авторах:

Сугоровский Артем Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru

Сугоровский Антон Васильевич, кандидат технических наук;
eLibrary SPIN: 6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Information about the authors:

Artyom V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN: 5575-3221; ORCID: 0000-0001-6955-814X;
E-mail: c123945@yandex.ru

Anton V. Sugorovsky, Candidate of Engineering Science;
eLibrary SPIN: 6572-5865; ORCID: 0000-0001-5930-1789;
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst676902>

© Н.А. Федосеев, Н.А. Ермошин, С.В. Алексеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ ВИБРАЦИОННОГО КАТКА

Цель. Выделение основных факторов для решения контактной задачи и последующее определение контактных напряжений под гладким вальцом катка в режиме вибрации.

Материалы и методы. Основой расчетных зависимостей выбрана теория Герца-Беляева. Так же проведен анализ работ Н.Я. Хархуты, А.В. Захаренко, С.В. Носова, С.В. Савельева и других исследователей. Учитывается инерционная составляющая массы катка и периодический характер воздействия внешней силы на грунт.

Результаты. Выделены основные принципы расчета контактных напряжений. Определен физический смысл коэффициентов, позволяющих осуществить переход от статического уплотнения к вибрационному. По результатам анализа предложен новый подход, учитывающий ранее не рассматриваемые характеристики технологического режима уплотнения. Учтены свойства, присущие дисперсному грунту.

Заключение. Статья посвящена изучению взаимодействия вальца катка с грунтом с точки зрения возникающих контактных напряжений. Предложенная методика характеризует контактные напряжения в зависимости от переменных времени и скорости движения катка. Результат, полученный в ходе вычислительного эксперимента, сопоставлен с фактическими данными.

Ключевые слова: грунт; уплотнение грунта; земляное полотно; контактные напряжения; вибрация; вибрационное уплотнение; уплотнение виброкатком.

Как цитировать:

Федосеев Н.А., Ермошин Н.А., Алексеев С.В. Методика определения контактных напряжений под вальцом вибрационного катка // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 115–133. doi: 10.17816/transsyst676902

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Fedoseev, N.A. Ermoshin, S.V. Alekseev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

METHOD FOR DETERMINING SURFACE STRESSES UNDER THE ROLLER OF A VIBRATING ROLLER

Aim. Identification of the main factors for solving the surface contact problem and subsequent determination of surface stresses under the flat wheel roller in a vibration mode.

Materials and Methods. The Hertz–Belyaev theory was selected as a basis for the estimation relations. The works of Kharkhuta, Zakharenko, Nosov, Savelyev and other researchers were also analyzed. The inertial component of the roller mass and a periodic nature of the impact of the external force on the soil are taken into account.

Results. The basic principles of calculating surface stresses are identified. The physical significance of the coefficients that facilitate the transition from static to vibration compaction has been determined. Following the analysis, we put forward a new approach that takes into account previously unconsidered characteristics of the compaction process. In addition, the properties inherent in dispersive soil are taken into account.

Conclusion. The paper studies the interaction of the roller wheel with the soil in terms of arising surface stresses. The proposed method characterizes surface stresses depending on the variables of time and roller speed. The result of the computing experiment is compared against the actual data.

Keywords: soil; soil compaction; roadbed; surface stresses; vibration; vibratory compaction; vibrating roller compaction.

To cite this article:

Fedoseev NA, Ermoshin NA, Alekseev SV. Method for determining surface stresses under the roller of a vibrating roller. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):115–133. doi: 10.17816/transsyst676902

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов уплотнения грунта на линейных объектах является его укатка гладковальцовым катком в вибрационном режиме [1–6].

Использование вибрации позволяет снизить рабочую массу машины без уменьшения уплотняющей способности [1, 7, 8].

Как результат, снижается металлоемкость и потребная мощность двигателя, следовательно, уменьшается стоимость машины и затраты на ее эксплуатацию и содержание.

По этой причине на вибрационные катки приходится значимая доля парка уплотняющей техники.

Однако при этом процесс работы катка в вибрационном режиме описан в литературе не так полно, как процесс работы катка в статическом режиме.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Решение контактной задачи применительно к вальцу катка приводится во многих источниках [7–13]. Для сопоставления между собой наиболее распространенных вариантов, предлагаемых разными авторами, составлена Табл. 1.

По данным, приведенным в Табл. 1, можно заметить, что зависимости (1)–(3) и (5), (6) имеют схожую структуру. Это объясняется использованием теории Герца-Беляева [7, 14]. Так как во всех зависимостях рассматривается воздействие вальца катка (абсолютно жесткого тела) на слой грунта (упруго-пластичного тела), то применение теории Герца-Беляева является оправданным.

В первом приближении контактное напряжение определяется как отношение вертикальной составляющей всех сил к площади контакта:

$$\sigma_{\text{е}} = \frac{F_{\text{аадо}}}{S_{\text{е}}} \quad (7)$$

Если определение вертикальной составляющей сил не представляет больших затруднений, особенно для статического случая загрузки [15], то площадь контакта является величиной, зависящей от деформаций грунта (Рис. 1).

Теория Герца-Беляева позволяет определять контактные напряжения без вычисления площади контакта. Это достигается за счет использования

Таблица 1. Основные методы определения контактных напряжений
и их характеристики**Table 1.** Main methods for determining contact stresses and their characteristics

Автор и ссылка на источник	Определение контактных напряжений	
	Формула	Переменные
Хархута Н.Я. [7, 8]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \quad (1)$	q – линейное давление по ширине вальца, МПа; E_0 – модуль деформации грунта, МПа; R – радиус вальца, см.
Хархута Н.Я. [7]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{k_{r\delta} \cdot \frac{P+Q}{B} \cdot E_0}{R}} \quad (2)$	P – амплитудное значение возмущающей силы, кгс; Q – действующая на валец силы тяжести, кгс; B – ширина вальца, см; $k_{r\delta}$ – коэффициент превышения, зависящий от отношения P/Q [7].
Носов С.В. [9,10]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{[q_{r\delta} + K_{\gamma}^2 \cdot q_{r\delta} \cdot a] \cdot E_0}{R}} \quad (3)$	$q_{r\delta}$ – линейная нагрузка на контакте вальца от массы рамы, кгс/см; K_{γ} – коэффициент эффективности использования виброкатка по сравнению со статическим катком [7]; $q_{r\delta} \cdot a$ – линейная нагрузка на контакте вальца и грунта от массы самого вальца, кгс/см.
Савельев С.В., Михеев В.В. [11]	$\sigma_{\epsilon} = \frac{M \cdot g}{2\pi \cdot \alpha_0 \cdot R \cdot B} \quad (4)$	M – масса, приходящаяся на валец, кг; g – ускорение свободного падения, м/с ² ; α_0 – угол раствора, соответствующей по величине дуге окружности, описываемой грунтом вокруг заглубленной части вальца, рад.
Захаренко А.В. [12]	$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} - T \cdot \sqrt{\frac{E_0}{q \cdot B^2 \cdot R}} \quad (5)$	T – дополнительное давление от вертикальной составляющей тягового усилия, кгс/см ² .
Игнатьев А.А. [13]	$\sigma_{\epsilon} = K_{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{\theta}\right) \quad (6)$	θ – общее время действия напряжений от воздействия вибрационного вальца, с; t – момент времени, на который определяется контактное напряжение, с.

в зависимостях прочностной характеристики грунта (E_0), которая отвечает за осадку под нагрузкой.

Рассмотрим детально формулы (1)–(3) и (5), (6). Формула (1) является прямым следствием теории Герца-Беляева и позволяет определять контактные напряжения от статической нагрузки. Получаемые значения соответствуют наибольшему контактному напряжению на границе валец-грунт. Преимуществом формулы является ее простота и высокая степень достоверности. Расхождения с экспериментальными данными находятся в пределах 5% [7]. Однако при этом результат вычислений представляет собой пиковые значения контактных напряжений на границе валец-грунт и не описывает зависимость контактных напряжений в точке на поверхности грунта от времени.

Формула (5) учитывает воздействие тягового усилия на уплотняемый слой. Тяговое усилие возникает только в том случае, когда валец является ведущим. Динамическая составляющая не учитывается, соответственно воздействие рассчитывается от прохода катка в статическом режиме. Однако влияние тягового усилия невелико даже для статического режима [12]. В случае включенного вибрационного режима учет тягового усилия влияет еще слабее, но при этом добавляет в зависимость неизвестные переменные, требующие дополнительных объемных расчетов и еще одного набора исходных данных.

Формула (3) является модернизированным видом формулы (1). Учтем, что формула (1) применима для статического воздействия вальца, а формула (3) предлагается для вибрационного режима работы катка. Отличие заключается в учете подрессоренной массы рамы, приходящейся на валец катка – как статического воздействия; и в учете произведения массы вальца на коэффициент эффективности – как вибрационного воздействия. Коэффициент эффективности позволяет произвести переход от виброкатка меньшей массы к статическому катку большей при условии равенства уплотняющей способности. Таким образом зависимость (3) не отражает реальных контактных напряжений под вальцом виброкатка, показывая контактные напряжения под вальцом статического катка со сходной уплотняющей способностью. К тому же выражение (3) не имеет зависимости от времени, позволяя определять лишь амплитудные напряжения.

Выражение (6), также являющееся модернизированным видом выражения (1) уже содержит зависимость контактного напряжения от времени, однако все равно по своей сути определяет контактное

напряжение от статического катка с эквивалентной уплотняющей способностью. Еще одним недостатком является отсутствие разделения общего воздействия машины на статическую составляющую и вибрационную составляющую, возникающую вследствие действия возбуждающей силы.

Выражение (2) составлено без использования коэффициента эффективности (K_{γ}), что позволяет прямо учесть вклад возбуждающей силы (P) в суммарное контактное напряжение. Коэффициент превышения ($k_{r\delta}$) зависит от величины возбуждающей силы и меняется в пределах от 5 до 3 [7], но учитывая наличие множителя величиной 0,5 влияние $k_{r\delta}$ уменьшается. Рассмотрим значимость $k_{r\delta}$ оставив из составляющих выражения (2) только две величины – множитель 0,5 и $k_{r\delta}$:

$$0,5 \cdot \sqrt{k_{r\delta}} = 0,5 \cdot \sqrt{[3 - 5]} = [0,87 - 1,12] \quad (8)$$

Коэффициент превышения отражает влияние инерционных сил на изменения контактных давлений за счет колебания дебаланса.

Выражение (4) единственное не опирается на теорию Герца-Беляева. Площадь контакта находится как произведение ширины вальца на длину дуги его контакта с уплотняемой средой. Длина дуги определяется величиной угла α_0 и радиусом вальца. Угол α_0 зависит от глубины осадки вальца в грунт. Глубина осадки вальца определяется изменением коэффициента уплотнения за один проход катка [11]. Соответственно для определения контактного напряжения необходимо знать изменение плотности по результату каждого прохода. Для получения таких данных необходимо либо проводить полевые измерения в процессе уплотнения, либо основываться на модели процесса уплотнения грунта катком. Таким образом, данная зависимость непригодна для определения контактных напряжений в ходе моделирования процесса уплотнения.

Стоит отметить, что в зарубежных исследованиях распространен метод конечно-элементного моделирования (FEM). Этот подход не требует определения контактных напряжений – достаточно найти результирующую величину всех сил, действующих в вертикальном направлении.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Общую нагрузку, действующую на грунт, можно разложить на составляющие: нагрузку от статического воздействия вальца и нагрузку

от вибрационной составляющей. Тогда, согласно методу суперпозиции, найдем контактное напряжение под вальцом вибрационного катка:

$$\sigma_{\text{с}} = \sigma_{\text{ст}} + \sigma_{\text{в}}, \quad (9)$$

На основе анализа методик, приведенного выше, определим контактные напряжения при уплотнении грунта катком в статическом режиме. Наиболее рациональной для расчета является зависимость (1), предложенная Н.Я. Хархутой. Ее недостатком является отсутствие связи контактных напряжений со временем. Определим закон, по которому контактные напряжения от статической нагрузки изменяются во времени.

Рассмотрим точку А на поверхности грунта (Рис. 1). В исходной позиции точка удалена от вальца, каток движется в ее сторону. На следующем этапе точка входит в зону воздействия вальца. Этот момент времени принимается за начальный (t_0):

$$t_0 = 0, \quad (10)$$

При дальнейшем движении катка контактные напряжения от статической составляющей нарастают вплоть до амплитудных значений $\sigma_{\text{ст}}^{\text{амп}}$. Амплитудные контактные напряжения определяются в соответствии с выражением (1):

$$\sigma_{\text{ст}}^{\text{амп}} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}}, \quad (9)$$

Можно считать, что изменение контактных напряжений от статической нагрузки происходит линейно [7, 9, 10]. Наибольшие напряжения соответствуют моменту времени перед разгрузкой грунта и совпадают с вертикальной осью вальца [7] (Рис. 1) – причина асимметричности эпюры контактных давлений в наличии тягового усилия, сдвигающего давление от центра вальца к его краю.

На Рис. 1 изображена схема взаимодействия вальца с грунтом. Грунт, обладая свойствами вязкого тела, демонстрирует отставание развития деформаций от развития контактных напряжений. То есть максимальные деформации наступают уже после окончания действия максимальных контактных напряжений.

С учетом смещения эпюры контактных напряжений в сторону движения катка и отставания деформаций от напряжения можно считать,

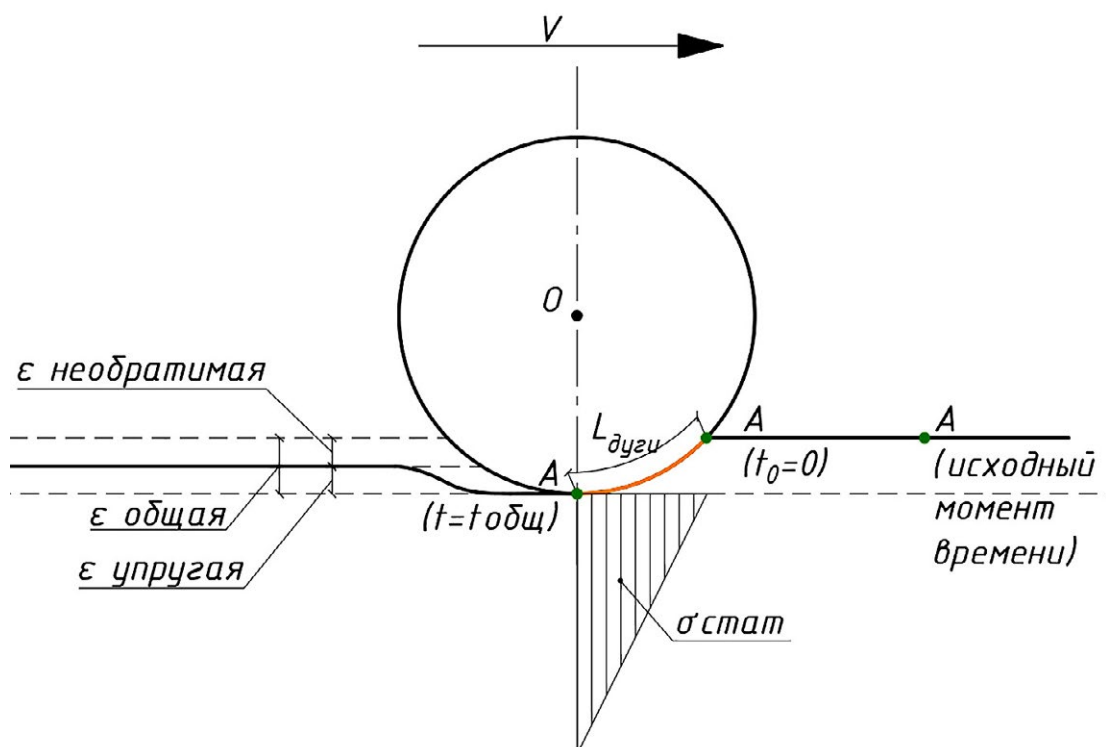


Рис. 1. Схема взаимодействия вальца катка с грунтом (контактные напряжения приведены для статического режима)

Fig. 1. Scheme of interaction between the roller and the soil (contact stresses are given for static mode)

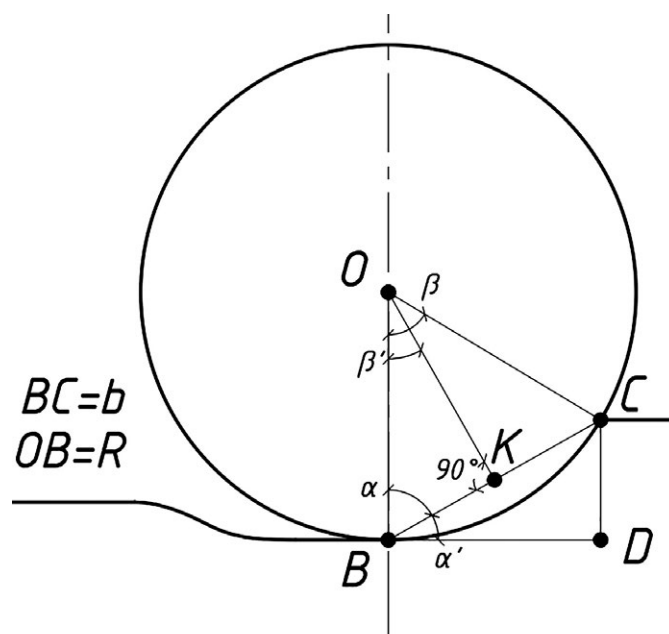


Рис. 2. Схема к определению геометрических параметров процесса уплотнения

Fig. 2. Scheme for determining the geometric parameters of the compaction process

что контактные напряжения распределяются между точкой начала контакта грунта с вальцом и вертикальной осью вальца (Рис. 1).

Н.Я. Хархута приводит зависимость, описывающую величину хорды b , стягивающей точки контакта вальца с грунтом [7]:

$$b = 4 \cdot \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет определить площадь контакта. Следует отметить, что зависимость (12) предполагает расчет в кгс/см, см и кгс/см². Причина этого – эмпирически определенный коэффициент 4, не имеющий размерности и, как следствие, не учитывающий возможности численного решения выражения (12) в размерностях, отличающихся от выше приведенных. Результат расчета выражен в сантиметрах (см).

Рассмотрим треугольник ОВС (Рис. 2). Найдем угол β как удвоенную величину угла β' , а угол β' определим из прямоугольного треугольника ОВК.

Тогда:

$$\beta = 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \quad (13)$$

Величина угла β определена в радианах. Зная радиус вальца, найдем длину дуги на границе контакта вальца с грунтом:

$$L_{\text{дуги BC}} = R \cdot 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \quad (14)$$

Возбуждающая сила, вызывающая вибрации, возникает благодаря вращению дебаланса [1, 3, 4, 8] и для конкретного момента времени находится как:

$$P(t) = P_{\text{дл}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (15)$$

$P_{\text{дл}}$ зависит от параметров дебаланса и либо указывается в технической документации машины (например, как центробежная сила), либо может быть определена из зависимости:

$$P_{\text{дл}} = 39,4 \cdot m_{\text{д}} \cdot r_{\text{д}} \cdot f^2 \quad (16)$$

Контактные напряжения от вибрационного воздействия найдем согласно выражению (7):

$$\sigma_{\text{кон}}(t) = k_{r\delta} \cdot \frac{P(t)}{B \cdot L_{\text{кон}} BC} = k_{r\delta} \cdot \frac{P_{\text{виб}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{B \cdot 2R \cdot \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)} \quad (17)$$

Контактные напряжения от статической составляющей так же зависят от времени. Как уже отмечалось ранее, амплитудные значения наступают в точке А (Рис. 1) в момент прохождения над этой точкой вертикальной оси вальца. Соответственно скорость изменения величины контактных напряжений в точке А прямо зависит от скорости поступательного движения катка.

Найдем длину горизонтальной проекции хорды b . Для этого рассмотрим треугольники ОВС и ВCD (Рис. 2). Искомый катет BD составляет:

$$BD = b \cdot \cos(\alpha') \quad (18)$$

Угол α' (градусы) можно определить с помощью треугольника ОВС:

$$\alpha' = 90^\circ - \alpha \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ - \beta}{2} \quad (20)$$

Угол β (радианы) вычислен ранее с помощью зависимости (13). Тогда угол α' (радианы) будет равен:

$$\alpha' = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi - 2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)}{2} = 0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \right) \quad (21)$$

Катет BD определяется выражением:

$$BD = b \cdot \cos\left(0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right) \right)\right) \quad (22)$$

Длина катета BD соответствует расстоянию, которое проходит каток нагружая точку А на пространстве грунта. В начальный момент времени (t_0) точка А находится на правой границе эпюры контактных напряжений (Рис. 1), напряжения равны нулю. В конечный момент времени ($t_{\text{кон}}$) точка

А находится на левой границе эпюры контактных напряжений (Рис. 1), напряжения максимальны.

Общее время воздействия вальца на грунт за один проход зависит от скорости движения катка:

$$t_{\text{вд}} = \frac{BD}{v} = \frac{b \cdot \cos\left(0,5 \cdot \left(2 \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)\right)}{v} \quad (23)$$

Из подобия треугольников определим значение контактных напряжений от статической составляющей в точке А в момент времени t (Рис. 1):

$$\sigma_{\text{ст}}(t) = \sigma_{\text{ст}} \cdot \frac{t}{t_{\text{вд}}} = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \frac{t \cdot v}{b \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)} \quad (24)$$

Подстановка значения b в выражение (24) не правомерна из-за эмпирического характера b , сказывающегося на размерности (см. выражение (12)).

В соответствии с равенством (9) запишем выражение, определяющее значение контактных напряжений от статического и вибрационного воздействий одновременно в зависимости от времени. Учтем так же, что линейное давление по ширине вальца q определяется отношением веса катка, приходящегося на валец, к ширине вальца. Подставим значение b в слагаемое, отвечающее за динамическое воздействие:

$$\sigma_{\text{с}}(t) = \sqrt{\frac{q \cdot E_0}{R}} \cdot \frac{t \cdot v}{b \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)\right)} + k_{\text{в}} \cdot \frac{P_{\text{в}} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{B \cdot 2R \cdot \arcsin\left(\frac{0,5b}{R}\right)} \quad (25)$$

Выражение (25) имеет граничные условия. Контактные напряжения в точке А развиваются только в период движения вальца катка над ней – во все остальное время контактные напряжения равны нулю. Граничные условия задаются зависимостью (26):

$$t_0 \leq t \leq t_{\text{вд}} \quad (26)$$

С учетом граничных условий общие контактные напряжения определяются системой выражений:

$$\sigma_{\varepsilon}(t) = \begin{cases} \hat{\alpha}_0 + \hat{\beta}_0 t & \text{if } t \in [0, T] \\ 0 & \text{if } t \notin [0, T] \end{cases}$$

Коэффициент превышения $k_{\gamma\delta}$ зависит от соотношения возбуждающей силы и веса, приходящегося на валец [7]:

$$k_{r\delta} = -0,2016 \frac{P}{O} + 5,3332 \quad (27)$$

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ

Для оценки адекватности полученной зависимости (25) проведено сравнение с зависимостями (1)–(3), (6). Зависимости (5) и (4) не рассматриваются, так как результат вычислений зависимости (5) имеет малые отклонения от результата вычисления выражения (1), а зависимость (4) требует для ее численного решения иметь набор входных данных, получаемых в результате полевого измерения осадки грунта в процессе уплотнения.

Для численного решения задачи различными методами выбран каток НАММ 3516 со следующими характеристиками (Табл. 2):

Таблица 2. Технические характеристики гладковальцового катка HAMM 3516

Table 2. *Technical specifications of the HAMM 3516 smooth drum roller*

Параметр	Соответствующая переменная	Численное значение
Масса, приходящаяся на валец	M , кг	9305
Частота колебаний	f , Гц	40
Амплитудная возбуждающая сила	$P_{a1 \text{ } i \text{ } e}$, кН	215
Ширина вальца	B , мм	2140
Радиус вальца	R , мм	752
Рабочая скорость, принятая при расчете	v , км/ч	2
Коэффициент превышения	$k_{r \delta}$	4,86
Подрессоренная масса рамы	$q_{i1 \text{ } a}$, кг	4485
Вертикальная составляющая тягового усилия	T , кН	7

В качестве уплотняемой среды назначен песчаный грунт с коэффициентом плотности (по методу стандартного уплотнения РосДорНИИ) 0,85, что соответствует начальному этапу уплотнения после доставки грунта автомобилями-самосвалами и его распределения бульдозерами. Модуль деформации (E_0) составляет 20 МПа.

Результат численного эксперимента представлен на Рис. 3.

Из рисунка Рис. 3 видно, что контактные напряжения, рассчитанные по предложенной выше зависимости, могут принимать отрицательные значения. Так как грунт не воспринимает растягивающие напряжения,

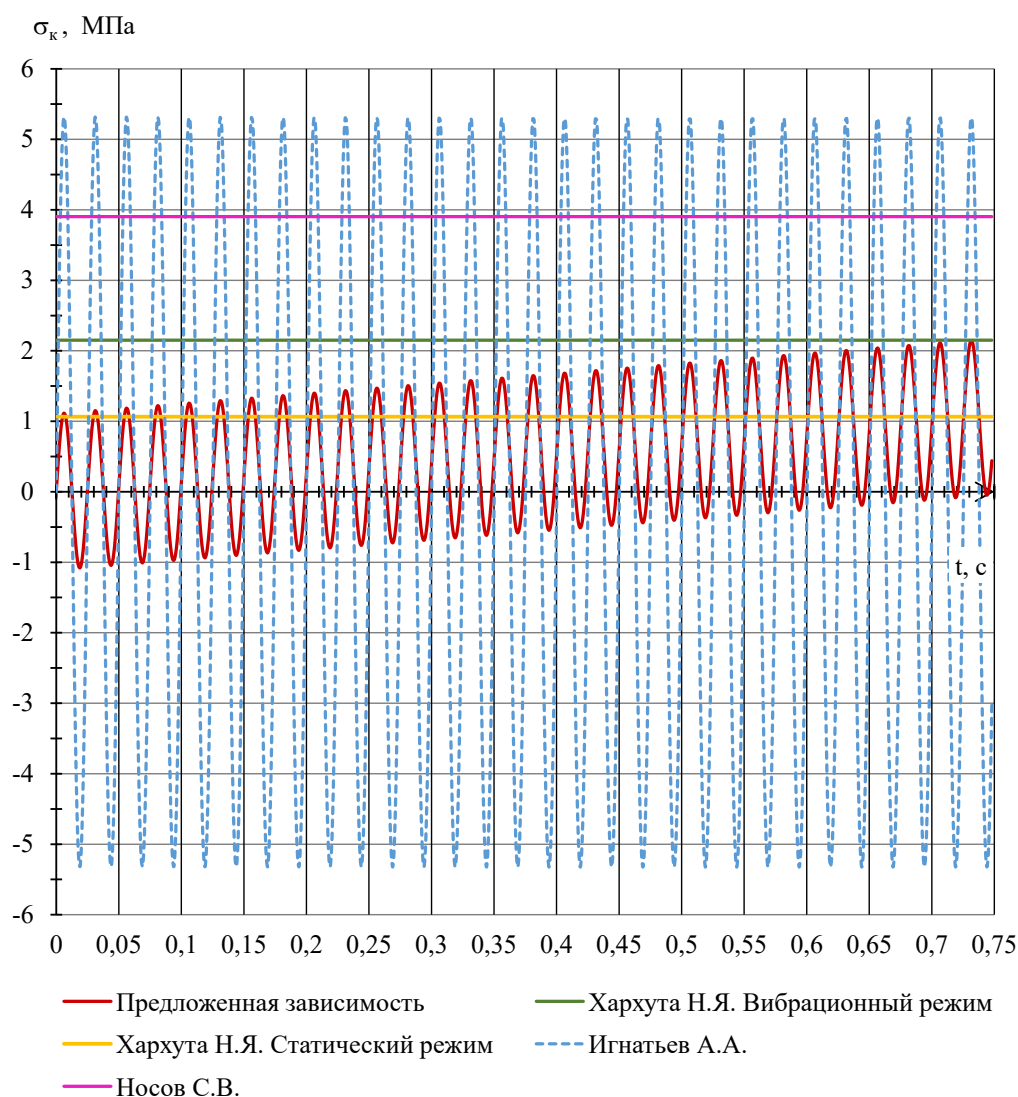


Рис. 3. Сопоставление контактных напряжений в зависимости от времени при использовании различных методик

Fig. 3. Comparison of contact stresses over time when using different methods

то отрицательные контактные напряжения невозможны [16, 17]. Необходимо ввести дополнительные граничные условия:

$$\sigma_{\epsilon}(t) = \begin{cases} \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) & \text{если } \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) > 0 \\ 0 & \text{если } \hat{\sigma}_{\epsilon}(t) \leq 0 \end{cases}$$

На Рис. 4 показана откорректированная зависимость контактных напряжений от времени. Для сравнения на Рис. 4 представлены результаты расчета по выражениям, предложенные Н.Я. Хархутой.

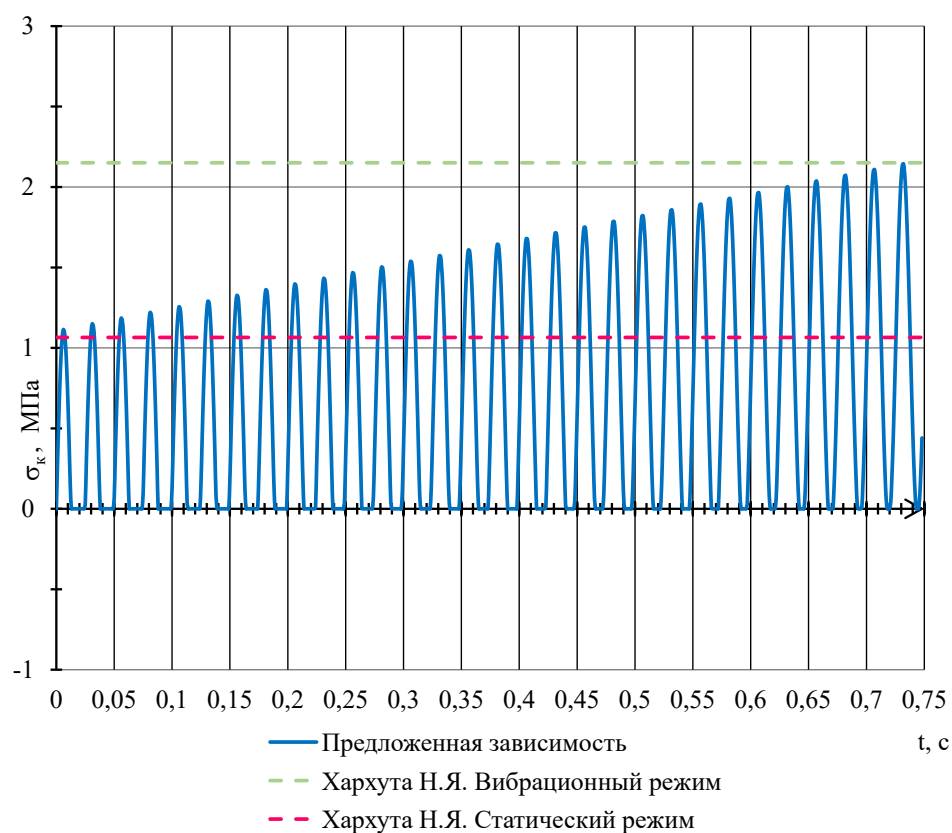


Рис. 4. Сопоставление контактных напряжений в зависимости от времени при использовании различных методик

Fig. 4. Comparison of contact stresses over time when using different methods

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены различные методы определения контактных напряжений. Так как контактные напряжения вызваны перемещающимся объектом – вальцом катка, то необходим учет изменения величины контактных напряжений во времени.

Методики, не отражающие временной характер нагружения, не могут в полной мере дать оценку воздействия рабочего органа на грунт. В соответствии с рисунком 3 характер нагрузки является циклическим.

Существующие методики, использующие переменную времени, не учитывают характер движения катка и, как следствие, постепенное возрастание доли статической нагрузки в общем напряжении.

Следует обратить внимание, что ряд авторов использует переменную K_{γ} для перехода от теоретических выкладок Герца-Беляева, разработанных для случая статического нагружения, к вибрационному нагружению. Однако эта переменная показывает, во сколько раз меньшей массой может обладать вибрационный каток по отношению к статическому без потери уплотняющей способности. Физический смысл K_{γ} не связан с контактным напряжением, а сама величина K_{γ} зависит от гранулометрического состава грунта. Результатом использования данной переменной для перехода к вибрационной нагрузке является излишнее завышение контактных напряжений (для случая уплотнения песка) или же занижение (для случая уплотнения глин). Столь значительные отклонения расчетных значений от фактических (данные Н.Я. Хархуты, подтвержденные экспериментами, можно принять за фактические) не позволяют оценить режим работы катка с точки зрения соблюдения рационального диапазона контактных напряжений (близких к пределу прочности, но не превышающих его).

Предложенная методика расчета учитывает фактор времени как в отношении поступательного перемещения вальца вдоль уплотняемой полосы, так и в отношении вибрационного воздействия. Учет инерционных сил производится за счет использования коэффициента превышения. Кроме того, принимается во внимание свойство грунта – отрицательные напряжения не возникают. Результат расчетов коррелирует с зависимостями Н.Я. Хархуты, выведенными для амплитудных значений напряжений. Вышеперечисленное говорит о применимости методики для определения контактных напряжений в любой момент времени на границе грунт-ваlec при работе катка в режиме вибрации.

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. Костельов М.П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2004. С. 72–82. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/9-dorozhnaya-tehnika-2004-2-s72-82.pdf>
2. Сонин В.В. Обзор технологий усиления слабых оснований дорожных насыпей // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 5. С. 104–107.
3. Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками. // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2008. С. 40–47. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
4. Тимофеев Д.М. Основные факторы и их зависимости, определяющие оптимальные режимы работы вибрационных катков при уплотнении песчаных грунтов // Инженерный вестник дона. 2019. № 1(52).
5. Тюремнов И.С., Краюшкин А.С., Шорохов Д.А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком НАММ 3411 // Вестник сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. № 6 (88). С. 828–840. doi: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840
6. Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г., Белодед А.С. Методика обоснования режимных параметров вибрационных катков для уплотнения грунтов // Вестник сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 1 (53). С. 27–33. doi: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-27-33
7. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. Москва: Транспорт, 1975.
8. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов: Теория, расчет и конструкции. Москва; Ленинград: Машгиз, 1953.
9. Носов С.В. Методология совершенствования технологий уплотнения дорожно-строительных материалов. Липецк: Липецкий гос. технический ун-т, 2015.
10. Носов С.В. Математическое моделирование процесса уплотнения дорожно-строительных материалов жестким вальцом дорожного катка // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 31–35. EDN: QCEJOT
11. Михеев В.В., Савельев С.В. Моделирование характеристик деформируемых грунтов в процессе их уплотнения цилиндрическими рабочими органами катков // Вестник сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 4 (50). С. 29–36. EDN: WZQPZV

12. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2005.
13. Игнатьев А.А. Определение рациональных параметров вибрационных катков для уплотнения грунта: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2013.
14. Малич Н.Г., Блохин В.С. Особенности уплотнения среды вальцами катков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 345–355. EDN: KKOYR
15. Кондрашов Н.А. Исследование и расчет параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий: дис. ... кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2016. Дата обращения: 12.12.2024. Режим доступа: https://dis.spbgasu.ru/file/1783/download?token=Waer_8Lm
16. Бугров А.К. Механика грунтов. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2011.
17. Федосеев Н.А., Алексеев С.В., Шевченко С.М. Обзор теоретических предпосылок к уплотнению грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 2. С. 200–214. doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

REFERENCES

1. Kostel'ov MP. Possibility and efficiency of compaction of soils of various types and conditions using vibratory rollers. Catalogue-reference book "Road equipment and technologies". 2004:10–18. Accessed: 12.12.2024. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/9-dorozhnaya-tehnika-2004-2-s72-82.pdf>. (In Russ.)
2. Sonin VV. Review of technology for strengthening weak foundations of road embankments. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016;(5):104–107. (In Russ.)
3. Kostel'ov MP. Again about the quality and efficiency of compaction of various soils with modern vibratory rollers. *Katalog-spravochnik "Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii"*. 2008:40–47. Accessed: 12.12.2024. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf> (In Russ.)
4. Timofeev DM. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Inzhenernyi vestnik dona*. 2019;1(52). (In Russ.)
5. Tyuremnov IS, Krayushkin AS, Shorokhov DA. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2022;6(88):828–840. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840
6. Saveliev SV, Poteryaev IK, Buriy GG, Beloded AS. Method of justification of operational parameters of vibrating rollers for compaction. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2017;1(53):27–33. (In Russ.) doi: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-27-33
7. Harkhuta NYa. *Strength, stability and compaction of roadbed soils*. Moscow: Transport; 1975. (In Russ.) Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006957405>
8. Harkhuta NYa. *Soil Compaction Machines: Theory, Calculation and Design*. Moscow; Leningrad: Mashgiz; 1953. (In Russ.)

9. Nosov SV. *Methodology for improving technologies for compacting road construction materials*. Lipeck: Lipeckij gos. tekhnicheskij un-t; 2015. (In Russ.)
10. Nosov SV. Mathematical modeling of the process of compaction of road construction materials by a rigid roller of a road roller. *Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2013;4:31–35. (In Russ.) EDN: QCEJOT
11. Miheev VV, Savel'ev SV. Modeling the characteristics of deformable soils during their compaction by cylindrical working bodies of rollers. *Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2016;4(50):29–36. (In Russ.) EDN: WZQPZV
12. Zakharenko AV. *Theoretical and experimental studies of the processes of compaction of soils and asphalt concrete mixtures by rollers* [abstract of the dissertation]. Omsk; 2005. (In Russ.)
13. Ignat'ev AA. *Determination of rational parameters of vibratory rollers for soil compaction* [abstract of the dissertation]. Yaroslavl; 2013. (In Russ.)
14. Malich, NG, Blohin VS. Features of compaction between rollers. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2008;8:345–355. (In Russ.) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12363969>
15. Kondrashov NA. *Research and calculation of parameters of a multifunctional roller for compaction of asphalt concrete road surfaces* [dissertation]. St. Petersburg; 2016. Accessed: 12.12.2024. Available from: https://dis.spbgasu.ru/file/1783/download?token=Waer_8Lm (In Russ.)
16. Bugrov AK. *Mekhanika gruntov: schoolbook*. St. Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo un-ta; 2011. (In Russ.)
17. Fedoseev NA, Alekseev SV, Shevchenko SM. A review of the theoretical preconditions for soil compaction. *Modern transportation systems and technologies*. 2024;2(10):200–214. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

Сведения об авторах:

Федосеев Никита Александрович, аспирант;

eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;

E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент;

eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;

E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Information about the authors:

Nikita A. Fedoseev, graduate student;

eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;

E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Nikolaj A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, professor;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Sergey V. Alekseev, Candidate of Military Sciences, associate professor;

eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;

E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst642802>

© М.В. Петроченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОЕКТНОЙ ГРУППЫ И ВЛИЯНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ НА ПРОЕКТНЫЕ РИСКИ

Цель. Разработка методики оценки качества кадрового потенциала проектной группы и прогнозирования влияния уровня профессиональной подготовленности специалистов на технико-экономические показатели и инжиниринговые риски безопасной эксплуатации планируемых к строительству транспортных сооружений.

Материалы и методы. Качество проектов транспортных сооружений определяется применением инновационных технических и технологических решений, конструкционных материалов и зависит от уровня квалификации специалистов проектных групп. В основу методики оценки качества кадрового потенциала проектной группы положено допущение о том, что квалификация проектировщика является латентной (скрытой переменной), зависящей от присущих специалисту квалификационных признаков. Количественные характеристики признаков являются случайными величинами. В связи с этим, показатели качества разрабатываемых проектов имеют вероятностный характер, что требует анализа рисков возникновения проектных (инжиниринговых) ошибок. Для оценки квалификации специалистов и ее влияния на технико-экономические показатели проектов предлагается использовать наряду с общеметодологическими принципами теории квалиметрии, методы многокритериального и статистического анализа. Количественные характеристики квалификационных признаков (их математические ожидания) объединяются в интегральный показатель квалификации посредством комплексного использования математических методов мультиаддитивной и мультипликативной свертки.

Результаты. Получена аналитическая модель уровня квалификации специалиста, учитывающая влияние на обобщенный показатель качества как взаимозависимых, так и независимых частных показателей профессиональной подготовленности.

Заключение. Проблема профессиональной подготовки кадров в наибольшей степени проявляется на стадии проектирования транспортных сооружений. В проекте закладываются основные свойства безопасности, надежности, экономичности и другие транспортно-эксплуатационные и технико-экономические показатели качества объектов транспортного строительства. Предложенная методика позволяет выявить функциональные соотношения между качеством кадрового потенциала проектной организации и уровнем качества проектных решений. Полученные при разработке методики функциональные соотношения позволяют оценить влияние квалификации на проектные риски и обеспечить возможность подбора кадрового состава, а также разработки мероприятий по повышению квалификации имеющихся специалистов.

Ключевые слова: кадровый потенциал; кадровый состав; качество кадрового потенциала; методика оценки качества кадрового потенциала; квалификация специалиста; квалификационные признаки; уровень квалификации; проектные риски.

Как цитировать:

Петроченко М.В. Методика оценки качества кадрового потенциала проектной группы и влияние квалификации на проектные риски // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 134–151. doi: 10.17816/transsyst642802

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **M.V. Petrochenko**

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF THE TALENT POOL IN A PROJECT TEAM AND HOW THEIR SKILLS INFLUENCE THE PROJECT RISK

Aim. To develop a methodology for assessing the quality of the talent pool in a project team and forecasting the impact of their expertise on technical and economic indicators and engineering risks of the safe operation of planned transport facilities.

Materials and Methods. The quality of transport facility projects is determined by innovative technical and technological solutions and construction materials. It also depends on the expertise of the design teams. The methods for assessing the quality of the talent pool in a design team is based on the assumption that the skills of a designer are latent (hidden variable) and depend on the skills attributes inherent in an expert. Quantitative characteristics of attributes are random variables. In this regard, the quality indicators of the projects being developed are probabilistic, which calls for an analysis of the risks of design (engineering) errors. To assess the skills of experts and their impact on the technical and economic indicators of projects, along with the general methodological principles of qualimetry theory, methods of multi-criteria and statistical analysis are proposed. Quantitative characteristics of skills attributes (their expected values) are combined into an integral skills indicator through the comprehensive use of mathematical methods of multi-additive and multiplicative convolution.

Results. We produced an analytical model of an expert's skills that takes into account the impact of both interdependent and independent private indicators of professional training on the generalized quality indicator.

Conclusion. The problem of professional training is most evident at the stage of designing transport facilities. The project establishes the main properties of safety, reliability, efficiency and other quality indicators of transport facility construction projects based on transport operating and technical and economic indicators. The proposed methodology allows for identifying functional relationships between the quality of the talent pool in a design team and the quality of design solutions. The functional relationships obtained during the development of the methodology make it possible to assess the impact of skills on project risks and ensure thorough hiring, as well as developing training programs for team experts.

Keywords: talent pool; workforce; talent pool quality; talent pool quality assessment methodology; skills of an expert; skills attributes; skills level; project risks.

To cite this article:

Petrochenko MV. Methods for assessing the quality of the talent pool in a project team and how their skills influence the project risk. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):134–151. doi: 10.17816/transsyst642802

ВВЕДЕНИЕ

Качество строительства зависит от уровня квалификации кадрового состава организации как на стадии проектирования, так и на последующих стадиях жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта. Состояние профессиональных компетенций влияет на безопасность работы возводимых зданий и сооружений, их технико-экономические показатели, формирование конкурентных преимуществ организации на строительном рынке и определяет стратегию ее дальнейшего развития. С особой остротой проблема профессиональной подготовки кадров проявляется на стадии проектирования зданий и сооружений, поскольку именно в проекте закладываются основные свойства безопасности, надежности, экономичности и другие технико-экономические показатели объектов [1, 2]. Все больше проявляется необходимость в наличии алгоритмов достоверного определения профессиональной подготовленности специалистов при создании проектных групп и подборе их состава.

Поэтому разработка методов оценки качества кадрового потенциала проектной группы и влияние квалификации на проектные риски является одним из основных вопросов решения научной проблемы создания системы моделей и методов квалиметрического моделирования процессов контроля и оценки качества проектирования и строительства транспортных сооружений.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОЕКТНОЙ ГРУППЫ

Кадровый потенциал проектной группы предлагается рассматривать как результат синтеза знаний, навыков и умений, отражающий профессиональные компетенции сотрудников организации [3]. Следует отметить, что иногда проектные организации имеют кадровый потенциал, но не реализовывают его из-за нерационального построения организационно-технологических схем выполнения проектных работ.

На сегодняшний день нет единой методики оценки качества кадрового потенциала, при этом часто один и тот же метод оценки относят к разным видам классификации. В современной научной литературе, теории и практике используются следующие методы оценки квалификации: биографический метод [4], деловые характеристики [5], собеседование [6], оценка по результатам [7], метод парных сравнений [8], метод балльной оценки [9], метод приоритетов [10], тестирование [11],

ранжирование [12], метод самооценки [13], метод экспертной оценки [14], метод анкетирования [15], метод деловых игр [16], метод оценки достижения целей [17], метод «360 градусов» [18], решение кейсов [19], метод функционально-стоимостной оценки [20] и др.

Каждый из представленных методов имеет свои преимущества, недостатки и ограничения. Преимущества этих методов сводятся к наглядности и простоте их применения, позволяют составить суждение о работнике за короткий промежуток времени, некоторые не требуют особых затрат и предварительной подготовки. Основными недостатками методов являются: сложность получения исходной информации, субъективизм, отсутствие возможности получения количественных оценок, измерение показателей квалификации в шкале рангов, невозможность прогнозирования динамики качества подготовки специалистов в зависимости от опыта работы. Например, при использовании метода тестирования реализация потенциала тестовых методик зависит от того, насколько грамотно и уместно они применяются, а ошибки в применении обесценивают результаты даже в случае использования изначально качественных методик [11]. Экспертные методы оценки осуществляются на базе опыта и знаний экспертов, но субъективность оценок, отсутствие универсальности применения по причине субъективизма, а также дороговизна снижают возможность использования данного метода [21].

Но самое главное заключается в том, что все имеющиеся методы позволяют оценить качество кадрового потенциала в прошлом. Они не позволяют спрогнозировать способности работника при необходимости применения инновационных технологий проектирования и строительства транспортных сооружений. Для преодоления этого противоречия необходимо разработать методику оценки качества кадрового потенциала, учитывающую текущий уровень профессиональной подготовленности специалиста и возможность разработки мероприятий по его повышению для разработки инновационных проектов [22]. Это позволит исключить проектные ошибки, снизить влияние квалификации специалистов проектной группы на инжиниринговые риски.

Анализ существующих методов оценки качества подготовки кадров показывает, что квалификация специалиста, в общем случае, должна расцениваться как скрытая переменная и являться обобщением частных показателей (признаков). Иными словами, требуемые навыки, умения

и знания выступают в роли определяющих признаков профессиональной подготовленности. Для разработки методики оценки качества кадрового потенциала проектной группы и влияния квалификации на проектные риски (ущерб от неверных проектных решений) необходимо иметь количественную оценку уровня квалификации сотрудника. При этом квалификация специалиста определяется присущими ему квалификационными признаками (образование, опыт работы по специальности, опыт работы по выполнению конкретных проектных работ, опыт работы в проектной организации и др.). Каждый из квалификационных признаков имеет свою меру вклада в обобщенный (интегральный) показатель квалификации. При таком подходе непосредственная оценка интегрального показателя квалификации в количественном выражении может быть получена методом мультиаддитивной или мультипликативной свертки частных показателей (квалификационных признаков).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРОЕКТНОЙ ГРУППЫ

Предлагаемая методика оценки качества кадрового потенциала проектной группы основывается на следующих принципах:

1. Квалификация специалистов проектной группы определяется множеством квалификационных признаков (квалификационных требований), количественными эквивалентами которых являются дифференциальные показатели.
2. Уровень квалификации кадрового потенциала, являясь интегральным свойством, основывается на иерархии квалификационных признаков (профессиональных свойств каждого специалиста).
3. Значения квалификационных признаков на любом из уровней иерархии могут быть оценены единичным нормированным (дифференциальным) показателем профессиональной подготовленности.
4. Дифференциальные показатели, характеризующие квалификационные признаки, присущие конкретному специалисту проектной группы, имеют стохастическую природу.
5. Квалификационные признаки (профессиональные свойства специалистов) могут быть представлены в виде графа-дерева, имеющего иерархическую структуру. На каждом уровне иерархии и в пределах одного уровня квалификационные признаки

- имеют разную меру вклада (вес, значимость) для обобщенного (интегрального) показателя качества подготовки специалиста.
6. Значения квалификационных признаков (дифференциальных показателей) могут быть как зависимыми по приращению один от другого, так и независимыми.
 7. Суммарное значение меры вклада всех квалификационных признаков (как взаимозависимых, так и независимых) в обобщенный (интегральный) показатель квалификации специалиста должно удовлетворять ограничению:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (1)$$

где α_i – вес (значимость) частного i – го квалификационного признака (дифференциального или нормированного частного показателя, критерия) K_i .

Качество кадрового потенциала определяется множеством управляемых и неуправляемых переменных. Наиболее обоснованным подходом к оценке качества кадрового потенциала является определение степени его соответствия эталону. Так как качество кадрового потенциала проектной группы представляет собой комплекс квалификационных признаков, возникает потребность математического описания уровня квалификации на основе выбора формы свертки дифференциальных показателей.

При этом необходимо учитывать следующие проблемы синтеза обобщенного показателя:

- 1) *сложность объяснения физического смысла интегрального показателя квалификации.* В методике предполагается, что интегральный показатель отражает степень соответствия конкретного сотрудника эталонному специалисту (характеризует степень приближения к эталону);
- 2) *разная размерность частных показателей качества.* Приведение значений частных показателей к одной размерности в методике выполняется посредством их нормирования;
- 3) *одни показатели стремятся к максимуму, другие к минимуму.* Противоречивость показателей устраняется за счет включения в расчеты их обратных величин;
- 4) *значения показателей, а также их весов являются случайными величинами.* При расчетах используются их статистические характеристики;

- 5) *показатели разных свойств могут быть для одного и того же объекта взаимозависимыми и независимыми по приращению.* Для учета взаимовлияния факторов в методике предложена аналитическая модель синтеза обобщенного показателя качества;
- 6) *субъективизм оценки весовых коэффициентов.* Проблема решается посредством применения экспертных методов.

Для математической формализации расчета обобщенного (интегрального) показателя качества кадрового потенциала проектной группы применимы следующие способы многомерной свертки дифференциальных или нормированных показателей:

1. Способ мультиаддитивной свертки, который применим для квалификационных признаков (профессиональных свойств), независимых по приращению друг от друга. Значение обобщенного показателя для такой ситуации рассчитывается по формуле (2):

$$F(x_i) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x_i) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{F_i(x)}{F_i^0(x)} \right) \rightarrow \max(\min) \quad (2)$$

где α_i – вес (значимость, мера вклада) частного i – го квалификационного признака качества (профессионального свойства) в обобщенный (интегральный) показатель качества кадрового потенциала проектной группы;

$f_i(x_i)$ – нормированное значение i – го квалификационного признака качества (профессионального свойства);

$F_i(x)$ – фактическое значение i – го квалификационного признака качества (профессионального свойства);

$F_i^0(x)$ – нормативное (требуемое, эталонное) значение i – го квалификационного признака качества (профессионального свойства);

n – количество свертываемых квалификационных признаков качества (профессиональных свойств).

2. Способ мультипликативной свертки, позволяющий при оценке кадрового потенциала проектной группы обобщать взаимозависящие по приращению квалификационные признаки (профессиональные свойства). В этом случае целевая функция для оценки обобщенного показателя квалификации примет следующий вид (3):

$$F(x_i) = \prod_{i=1}^n (f_i(x_i))^{\alpha_i} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{F_i(x)}{F_i^0(x)} \right)^{\alpha_i} \rightarrow \max(\min) \quad (3)$$

Разработка методики оценки качества кадрового потенциала проектной группы требует детального анализа возможности их применения.

Обобщенный критерий качества профессиональной подготовки специалиста $K_{Generalized}$ (4) может быть сформирован из совокупности присущих ему частных показателей квалификации (частных критериев), имеющих определенные фактические значения K_i :

$$K_{Generalized} = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_i^{i \uparrow \delta i} \rightarrow \max \quad (4)$$

где α_i – мера вклада, вес (значимость) частного i -го показателя (критерия) K_i . При этом расчеты должны выполняться с учетом ограничения (1).

$K_i^{i \uparrow \delta i}$ – нормированное значение i -го частного показателя (критерия) качества специалиста проектной группы;

n – количество учитываемых показателей (частных критериев), характеризующих уровень подготовки специалиста проектной группы.

Не каждый показатель качества кадрового потенциала может быть принят в качестве частного критерия K_i , поэтому частные критерии качества K_i должны соответствовать следующим требованиям:

1. Критерий $K_i^{i \uparrow \delta i}$ характеризуется степенью его воздействия на уровень квалификации, который будет учитываться обобщенным (интегральным) критерием $K_{Generalized}$.
2. Критерий $K_i^{i \uparrow \delta i}$ должен обладать свойством отсутствия избыточности, т.е. в обобщенном критерии $K_{Generalized}$ недопустимо дублирование одного и того же качественного показателя.

Для оценки качества кадрового потенциала проектной группы, помимо выбора вида многомерной дискретной свертки квалификационных признаков (профессиональных свойств) необходимо обосновать принципиальные положения по учету уровня их иерархии.

Структурирование квалификационных признаков может быть выполнено построением «иерархии дерева» показателей качества на основе следующих принципов:

1. В качестве обобщенного критерия качества кадрового потенциала проектной группы принимается показатель, являющийся результатом обобщения совокупности частных показателей.
2. Критерий формируется методом многомерной дискретной свертки из двух и более групп показателей евклидова пространства

квалификационных признаков с учетом специализации проектной группы.

3. Обобщенный критерий формируется с учетом значимости α_i формирующих его частных критериев.

В целях обоснования целевой функции и построении структуры обобщенного критерия $K_{Generalized}$ требуется решить следующие вопросы:

1. Определить коэффициент значимости α_i каждого критерия качества кадрового потенциала.
2. Разрешить «проблему размерности» частных критериев K_i .

Расчет коэффициентов значимости каждого показателя качества подготовки специалиста осуществляется методом парных сравнений. Суть метода сводится к построению «квадратной» матрицы $n \times n$. По каждой строке матрицы определяется сумма U_i присвоенных коэффициентов предпочтения. Значения коэффициентов предпочтения показателей по отношению друг к другу («>», «<» либо «=») устанавливаются методом экспертного опроса на основе мнения эксперта о вкладе того или иного показателя в обобщенный показатель. Затем вычисляются абсолютные приоритеты функций U_i , для чего каждая строка в матрице умножается на вектор-столбец U_i (5), используя выражение (6) рассчитывается значимость α_i :

$$A = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (6)$$

При отсутствии возможности применения методов экспертного опроса значения весовых коэффициентов α_i определяются на основе построения дерева показателей качества подготовки специалистов. Для этого дерево показателей качества приводится к матричной форме (Рис.).

Весовой коэффициент каждого частного показателя (критерия) качества определяется его уровнем в иерархии показателей, а также количеством и уровнем показателей, которые обеспечивают его достижение.

		Уровни обеспечиваемых показателей								
		P_s	1	2	3	...	...	...	...	...
Уровни оцениваемых показателей	P_i	Показатели								
			q_1	q_2	q_3	...	...	...	q_s	q_n
	1	q_1		δ_{12}	δ_{13}	...	...	...	δ_{1s}	δ_{1n}
	2	q_2	δ_{21}		δ_{23}	...	...	...	δ_{2s}	δ_{2n}
	3	q_3	δ_{31}	δ_{32}		...	...	...	δ_{3s}	δ_{3n}
	...	...	...	...	...		...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...		...	...	...
	...	...	...	...	...	...	...		...	...
	...	q_i	δ_{i1}	δ_{i2}	δ_{i3}	...	...	...		δ_{in}
	...	q_n	δ_{n1}	δ_{n2}	δ_{n3}	...	...	...	...	

Рис. Матричная форма представления дерева показателей качества (квалификации) кадрового потенциала проектной группы

Fig. Matrix form of presentation of the tree of quality indicators (qualifications) of the personnel potential of the project group

Исходя из этого значимость (весовой коэффициент) α_i частного показателя может определяться соотношением (7):

$$\alpha_i = \frac{P_i \left(\sum_{s=1}^n \delta_{is} P_s + P_i \right)}{\sum_{i=1}^n P_i \left(\sum_{s=1}^n \delta_{is} P_s + P_i \right)} \quad (7)$$

где P_i и P_s – соответственно, уровень i -го и s -го показателей качества;

$$\delta_{is} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ и } s \text{ являются смежными показателями;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для решения «проблемы размерности» используются не абсолютные, а нормированные значения показателей качества кадрового потенциала (8):

$$K_i^{\uparrow\delta\downarrow} = \frac{K_i^{factual}}{K_i^{normalized}} \quad (8)$$

где $K_i^{factual}$ и $K_i^{normalized}$ соответственно, фактические и нормированные значения i -го показателя качества кадрового потенциала.

В силу того, что не все критерии $K_i^{\uparrow\delta\downarrow}$ имеют одно и то же направление оптимизации, то в этом случае выражение (4) преобразуется в (9), где в одной части собираются максимизируемые критерии, а в другой минимизируемые.

Обозначим группу максимизируемых критериев через K_i ($i=1, 2, \dots, m$), а группу минимизируемых критериев K_i ($i=m+1, \dots, l$), тогда

$$K_{Generalized} = \sum_{i=1}^m \alpha_i K_i^{\uparrow\delta\downarrow} + \sum_{i=m+1}^l \alpha_i \frac{1}{K_i^{\uparrow\delta\downarrow}} \rightarrow \max \quad (9)$$

при следующих ограничениях:

$$n = m + l \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1.$$

Таким образом обобщенный критерий качества $K_{Generalized}$ органически связан с вариативностью качества исходных квалификационных признаков, поэтому частные критерии K_i качества кадрового потенциала будут определять саму систему оценки качества.

Для расчета обобщенного (интегрального критерия) показателя качества $K_{Generalized}$ методом мультипликативной свертки частных показателей по зависимости используется выражение (11):

$$K_{Generalized} = \frac{\prod_{i=1}^m q_i^{\max^{\alpha_i}}}{\prod_{i=m+1}^l q_i^{\min^{\alpha_i}}} \rightarrow \max \quad (11)$$

при следующем ограничении:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

где $q_i^{\max}$ – дифференциальное (нормированное) значение частного i -го показателя качества специалиста в случае его стремления к максимуму; $q_i^{\min}$ – дифференциальное (нормированное) значение частного i -го показателя качества специалиста в случае его стремления к минимуму; α_i – вес (значимость) частного i -го дифференциального (нормированного) показателя качества специалиста.

В числителе выражения (11) находятся произведение тех критериев, значение которых необходимо максимизировать, а в знаменателе находятся произведение тех критериев, которые надо минимизировать.

Расчет коэффициентов значимости каждого свойства осуществляется с использованием выражения (6).

Вычисление нормированных значений показателей, стремящихся к максимуму $q_i^{\max}$, осуществляется с применением выражения (12), а стремящихся к минимуму $q_i^{\min}$ – с применением выражения (13):

$$q_i^{\max} = \frac{K_i^{\text{factual}}}{K_i^e} \quad (12)$$

$$q_i^{\min} = \left(\frac{K_i^{\text{factual}}}{K_i^e} \right)^{-1} \quad (13)$$

где K_i^{factual} и K_i^e соответственно, фактические и нормативные (требуемые, эталонные) значения i -го показателя качества.

Так как качество кадрового потенциала зависит от множества критериев, возникает необходимость перехода от многокритериального выбора к однокритериальному с учетом как взаимно независимых, так и взаимно зависимых частных показателей качества. Для учета взаимовлияния факторов необходимо объединение этих способов для синтеза обобщенного критерия, что является новым в формировании интегрального критерия.

В целях получения комплексной оценки качества кадрового потенциала синтезируем выражения (9) и (11) в результирующие выражение (14):

$$K_{Integral} = \left[\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i K_i^{\uparrow \delta i} + \sum_{i=m+1}^l \alpha_i \frac{1}{K_i^{\uparrow \delta i}} \right) + \left(\frac{\prod_{i=l+1}^h q_i^{\max^{\alpha_i}}}{\prod_{i=h+1}^p q_i^{\min^{\alpha_i}}} \right) \right] \rightarrow \max \quad (14)$$

при следующих ограничениях:

$$n = m + l + h + p \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1,$$

где $K_{Integral}$ – обобщенный (комплексный, интегральный) критерий качества кадрового потенциала; α_i – вес (мера вклада, значимость) частного i -го критерия качества в обобщенный (интегральный) показатель; $K_i^{\uparrow \delta i}$ – значение частного нормированного критерия качества кадрового потенциала для критериев, независимых по приращению друг от друга; $q_i^{\max}$ – нормированное значение частного i -го показателя качества кадрового потенциала при стремлении его к максимуму, для критериев, зависящих по приращению друг от друга; $q_i^{\min}$ – нормированное значение частного i -го показателя качества кадрового потенциала при стремлении его к минимуму, для критериев, зависящих по приращению друг от друга; n – количество частных критериев, подлежащих учету при определении качества подготовки проектной группы соответствующей специализации; m – количество максимизируемых частных критериев мультиаддитивной свертки; l – количество минимизируемых частных критериев мультиаддитивной свертки; h – количество максимизируемых частных критериев мультипликативной свертки; p – количество минимизируемых частных критериев мультипликативной свертки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика оценки влияния профессиональной подготовленности специалистов на качество их работы и качество принимаемых проектных решений основана на общепринятом понятии квалификации специалиста, как совокупности присущих ему профессиональных компетенций, обуславливающих способность выполнять задачи по проектированию зданий и сооружений. В отличие от существующих, предлагаемая в методике аналитическая модель

уровня квалификации специалиста учитывает влияние на обобщенный показатель качества как взаимозависимых, так и независимых частных показателей профессиональной подготовленности. Она базируется на применении методов мультиаддитивной и мультипликативной свертки частных критериев, а также методах теории графов и матриц для повышения объективности расчета меры вклада (весовых коэффициентов) частных показателей в обобщенный (интегральный) критерий уровня квалификации специалистов проектных организаций. Значение предлагаемой методики для практики заключается в том, что она позволяет выявить функциональные соотношения между качеством кадрового потенциала проектной организации и технико-экономическими показателями проектных решений, от которых зависит безопасность зданий и сооружений. Методика обеспечивает возможность разработки мероприятий по повышению квалификации имеющихся специалистов. Направлением дальнейших исследований в области оценки качества кадрового потенциала и его влияния на качество инвестиционно-строительных проектов является учет неопределенности степени профессиональных компетенций специалистов и выявления закономерностей их влияния на проектные риски, характеризующиеся величиной ущерба и частотой проектных ошибок.

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. Ажмухамедов А.И., Проталинский О.М. Подбор персонала для проектно-ориентированных организаций в нечетких условиях // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 4. С. 771–782. EDN: RSXNRV
2. Ahmed A.R., Yermoshin N.A. Optimum design of cable-stayed bridges considering cable loss scenarios // Asian Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 25. No. 3. P. 2801–2809. doi: 10.1007/s42107-023-00946-1. EDN: GPKVQX
3. Рыбакова А.А., Лясковская Е.А. Управление кадровым потенциалом строительной организации // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2016. № 6. С. 5–12. EDN: WMKZNR
4. Маничев С.А. Проблемы применения биографических опросников в отборе персонала // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 12. Психология. Социология. Педагогика. 2009. № 3-2. С. 238–245. EDN: MBVZIR

5. Шахгираев И.У., Рахимова Б.Х. Потенциал персонала предприятия: управление и методы оценки // Региональные проблемы преобразования экономики. 2020. № 5(115). С. 116–122. doi: 10.26726/1812-7096-2020-04-116-122. EDN: WPFBUG
6. Мурашкин Н.В. Математическое моделирование подбора персонала // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 1(16). С. 13. EDN: YMAFFN
7. Судакова Е.С. Оценка трудового потенциала персонала: подходы, методы, методика // Вестник Евразийской науки. 2014. № 4(23). С. 97. EDN: TCFNHD
8. Петриченко Г.С., Крицкая Л.М., Петриченко Д.Г. Методика оценки компетентности кандидатов при отборе на вакантную должность // Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 2019. Т. 46, № 1. С. 130–137. doi: 10.18413/2411-3808-2019-46-1-130-137. EDN: AFWZJI
9. Жданов В.Ю. Разработка коэффициентно-балльной модели оценки персонала // Индустриальная экономика. 2022. Т. 2, № 2. С. 116–120. doi 10.47576/2712-7559_2022_2_2_116. EDN: TUOPTV
10. Марширова Л.Е., Марширов В.В. Алгоритмы мотивации и оценки персонала при проектной деятельности // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 12. С. 187–196. EDN: XESGGH
11. Батурин Н.А., Вучетич Е.В., Костромина С.Н., и др. Российский стандарт тестирования персонала // Организационная психология. 2015. Т. 5, № 2. С. 67–138. EDN: UKQHZV
12. Никитенкова О.В. Применение математического моделирования при формировании кадрового потенциала предприятия. В кн.: ИННОВАЦИИ: БИЗНЕС. ОБРАЗОВАНИЕ. Материалы международной научнопрактической конференции. Смоленский институт бизнеса и предпринимательства; ноябрь 21–22, 2013; под ред. В.И. Грушенко. Киров: МЦНИП, 2014. С. 71–89. EDN: SIBQGP
13. Чуднова О.В. Самооценка персонала как способ повышения эффективности труда // Гуманитарный научный вестник. 2020. № 3. С. 123–126. doi: 10.5281/zenodo.3764122. EDN: DKHDSU
14. Афанасьев В.Я., Воронцов Н.В., Байкова О.В. Анализ о оценка кадрового потенциала персонала организации на современном этапе // Вестник университета. 2020. № 7. С. 5–13. doi: 10.26425/1816-4277-2020-7-5-13
15. Максимова Л.В., Шойнхорова В.Р., Максимов И.С. Методы оценки кадрового потенциала сотрудников промышленных предприятий и предприятий сферы услуг // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. Экономика и управление. 2018. № 1. С. 90–101. doi: 10.24866/2311-2271/2018-1/90-101
16. Урынгалиева А.А. Применение деловых игр для оценки качества расстановки кадров // Вестник евразийской науки. 2017. Т. 9, № 5. С. 56. EDN: YKWGSU
17. Зонova П.О., Пенский О.Г. О математической оценке величины достижения поставленной цели // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2009. № 3. С. 53–57. EDN: KHNUQX

18. Николаев М.В. «Оценка 360 градусов» в системе управления персоналом организаций // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12. № 8А. С. 287–296. doi: 10.34670/AR.2022.11.10.035
19. Евплова Е.В., Матвеева П.А., Матеев В.В. и др. Система оценки высококлассных специалистов // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8. № 4(29). С. 146–150. doi: 10.26140/anie-2019-0804-0030
20. Носырева И.Г., Москвитина Н.В. Функционально-стоимостной анализ как инструмент совершенствования системы управления персоналом в бюджетном образовательном учреждении высшего образования // Экономика труда. 2019. Т. 6. № 2. С. 971–990. doi: 10.18334/et.6.2.40597. EDN: LHNHTJ
21. Рябчук П.Г., Федорова К.А., Апухтин А.С., Плужникова И.И. Анализ современных методик оценки кадрового потенциала // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2017. № 9(103). С. 18. EDN: ZGZRYH
22. Manoharan K., Dissanayake P., Pathirana C., et al. A Constructive System to Assess the Performance based Grading of Construction Labour through Work-Based Training Components and Applications // Construction Economics and Building. 2023. Vol. 23, N. 3/4. P. 107–124. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v23i1/2.8390>

REFERENCES

1. Azhmukhamedov AI, Protalinsky OM. Personnel Management of Project Oriented Organizations under Uncertainty. *Transactions TSTU*. 2013;19(4):771–782. (In Russ.) EDN: RSXNRV
2. Ahmed AR, Yermoshin NA. Optimum design of cable-stayed bridges considering cable loss scenarios. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2024;25(3):2801–2809. doi: 10.1007/s42107-023-00946-1. EDN: GPKVQX
3. Rybakova AA, Lyaskovskaya EA. Personnel management of construction organizations. *Electronic scientific & practical journal “Economics and innovations management”*. 2016;(6). (In Russ.) EDN: WMKZNR
4. Manichev SA. Problems of application of biographic questionnaires in personnel selection. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 12. Psikhologiya. Sotsiologiya. Pedagogika*. 2009;(3-2):238–245. (In Russ.) EDN: MBVZIR
5. Shakhgiraev IU, Rakhimova BK. Enterprise personnel potential management and evaluation methods. *Regional'nye problemy preobrazovaniya jekonomiki*. 2020;5(115):116–122. (In Russ.) doi: 10.26726/1812-7096-2020-04-116-122. EDN: WPFBUG
6. Murashkin NV. The mathematical modeling of recruitment. *The Scientific Journal “Modeling, Optimization and Information Technology”*. 2017;1(16):13. (In Russ.) EDN: YMAFFN
7. Sudakova ES. Assessment of personnel labor potential: approaches, methods, methodology. *The Eurasian Scientific Journal*. 2014;4(23). (In Russ.) EDN: TCFNHD

8. Petrichenko GS, Kritskaya LM, Petrichenko DG. Methodology of estimation of the competence of candidates at selection to vacant stand. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics Information technologies*. 2019;46(1):130–137. (In Russ.) doi: 10.18413/2411-3808-2019-46-1-130-137. EDN: AFWZJI
9. Zhdanov VY. Development of coefficient-point model for personnel assessment. *Industrial Economy*. 2022;2(2):116–120. (In Russ.) doi: 10.47576/2712-7559_2022_2_2_116. EDN: TUOPTV
10. Marshirova LE, Marshirov VV. Algorithms of employee motivation and performance appraisal in project activities. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2016;(12):187–196. (In Russ.) EDN: XESGGH
11. Baturin NA, Vuchetich YV, Kostromina SN, et al. Russian Standard for Personnel Testing. *Organizational Psychology*. 2015;5(2):67–138. (In Russ.) EDN: UKQHZV
12. Nikitenkova OV. Primeneniye matematicheskogo modelirovaniya pri formirovani kadrovogo potentsiala predpriyatiya. In: *INNOVATSII: BIZNES. OBRAZOVANIY. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii. Smolenskiy institut biznesa i predprinimatel'stva; nov. 21-22, 2013; editor Grushenko VI*. Kirov: MCNIP; 2014:71–89. (In Russ.) EDN: SIBQGP
13. Chudnova OV. Personnel self-assessment as a way to increase labor efficiency. *Humanitarian Scientific Bulletin*. 2020;(3):123–126. (In Russ.) doi: 10.5281/zenodo.3764122. EDN: DKHDSU
14. Afanasyev VY, Vorontsov NV, Baykova OV. Analysis and assessment of personnel capacity of the organization's staff at present stage. *Vestnik Universiteta*. 2020;(7):5–13. (In Russ.) doi: 10.26425/1816-4277-2020-7-5-13
15. Maksimova LV, Shoinkhorova VR, Maksimov IS. Assessment methods of HR potential of employees in industrial and service companies. *The bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*. 2018;(1):90–101. (In Russ.) doi:10.24866/2311-2271/2018-1/90-101
16. Uryngaliyeva AA. The use of business games for assessing the quality of placement. *The Eurasian Scientific Journal*. 2017;9(5):56. (In Russ.) EDN: YKWGSU
17. Zonova PO, Penskiy OG. O matematicheskoy otsenke velichiny dostizheniya postavlennoy tseli. *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2009;(3):53–57. (In Russ.) EDN: KHNUQX
18. Nikolaev MV. Evaluation of the 360 degrees in an organization's HR system. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2022;12(8A):287–296. (In Russ.) doi: 10.34670/AR.2022.11.10.035
19. Evplova YV, Matveeva PA, Mateev VV, et al. High-class employess assessment system. *Azimuth of Scientific Research: Economics and Administration*. 2019;8(4):146–150. (In Russ.) doi: 10.26140/anie-2019-0804-0030
20. Nosyreva IG, Moskvitina NV. Functional and cost analysis as a tool for improving the personnel management system in the budgetary educational institution of higher education. *Russian Journal of Labor Economics*. 2019;6(2):971–990. (In Russ.) doi: 10.18334/et.6.2.40597 EDN: LHNHTJ

21. Ryabchuk PG, Fedorova KA, Apukhtin AS, Pluzhnikova II. Analysis of modern methods evaluation of staff potential. *Upravleniye ekonomicheskimi sistemami: elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2017;(9):18. (In Russ.) EDN: ZGZRYH
22. Manoharan K, Dissanayake P, Pathirana C, et al. A Constructive System to Assess the Performance based Grading of Construction Labour through Work-Based Training Components and Applications. *Construction Economics and Building*. 2023;23(3/4):107–124. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v23i1/2.8390>

Сведения об авторе:

Петроченко Марина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 6869-0011; ORCID: 0000-0002-4865-5319;
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru

Information about the authors:

Marina V. Petrochenko, Candidate of Engineering Science, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 6869-0011; ORCID: 0000-0002-4865-5319;
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<https://doi.org/10.17816/transsyst628807>

© М. В. Фёдорова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Цель. Целью работы является оценка экономической эффективности внедрения технологии блокчейн на примере холодильной цепи.

Материалы и методы. Для оценки экономической эффективности внедрения технологии блокчейн были рассчитаны капитальные затраты, уровень сокращения эксплуатационных затрат, определен период окупаемости. Анализ проведен на примере компании АО «Евросиб СПб – транспортные системы».

Результаты. Суть предлагаемого нами проекта заключается в разработке системы удаленной диспетчеризации, мониторинга и управления дизель-генераторным контейнером и системы удаленного мониторинга температурных параметров рефрижераторных контейнеров.

Заключение. По результатам выполненного исследования сделан вывод о целесообразности использования технологии блокчейн на примере холодильной цепи за счет повышения эффективности логистических операций. Это снижает эксплуатационные затраты, ускоряет доставку за счет сокращения времени на оформление документов, минимизирует риски и контролирует движение грузов на всех этапах перевозки.

Ключевые слова: блокчейн; холодильная цепь; рефрижераторный контейнер; скоропортящиеся грузы; оценка экономической эффективности.

Как цитировать:

Фёдорова М.В. Экономическая оценка совершенствования перевозочного процесса за счет внедрения технологии блокчейн // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11. № 1. С. 152–167. doi: 10.17816/transsyst628807

Rubric 3. TRANSPORT ECONOMICS

© **M.V. Fedorova**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

FEASIBILITY STUDY OF THE TRANSPORTATION PROCESS IMPROVEMENT DUE TO BLOCKCHAIN IMPLEMENTATION

Aim. To carry out a feasibility study of implementing a blockchain for refrigerating circuit.

Materials and Methods. To assess the feasibility of implementing a blockchain, capital costs and reduction in operating costs were calculated, and the payback period was determined. Eurosib SPb – Transport Systems JSC was used as an example.

Results. The idea behind the project is to develop a system for remote dispatching control, monitoring and control of a diesel generator container and a system for remote monitoring of temperature parameters of refrigerated containers.

Conclusion. The study have demonstrated feasibility of using a blockchain for a refrigerating circuit (as an example) by increasing the efficiency of logistics operations. This cuts operating costs, speeds up delivery due to less time required to process documents, minimizes risks, and controls the goods traffic at all stages of transportation.

Keywords: blockchain; refrigerating circuit; refrigerated container; non-durable goods; feasibility study.

To cite this article:

Fedorova MV. Feasibility study of the transportation process improvement due to blockchain implementation. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):152–167. doi: 10.17816/transsyst628807

ВВЕДЕНИЕ

В процессе цифровизации логистическая отрасль постепенно отказывается от бумажного документооборота и активного участия человека в процессе управления перевозками. Наиболее перспективными цифровыми технологиями, применяемыми в логистике, являются Blockchain (системы распределенного реестра), Cloud Services (облачные сервисы), AR/VR (дополненная/виртуальная реальность), IoT (интернет вещей), Big Data (аналитика больших данных), Predict Analytics.

В данной статье рассматривается технология Blockchain, так как именно она позволяет отслеживать все перемещения грузов, фиксировать все звенья в цепочке поставок, а также предоставляет сведения о логистической обработке товаров.

Блокчейн (от англ. block – «блок, модуль» и chain – «цепочка») – цепь связанных друг с другом блоков, наполненных определенной информацией (новыми записями и сведениями о прошлом узле). Элементы блокчейн наполняются сведениями о транзакциях в сети (действиями пользователей: переводами, покупкой, регистрацией прав и так далее).

Применение технологии блокчейн способствует прозрачности рынка грузоперевозок. Разработанная по заказу одного контрагента платформа может стать доступной многим и будет определять стандарты качества услуг для всех игроков рынка. За счет сокращения затрат времени и труда снижаются цены на перевозки. Создание единого информационного пространства открывает для владельцев грузов новые возможности.

Благодаря интеграции блокчейна и смарт-контрактов с помощью перехода на электронный документооборот происходит сокращение как эксплуатационных расходов, так и числа последовательных и посреднических операций. Вся информация о перемещении груза хранится на блокчейне, а смарт-контракты контролируют соблюдение всех условий поставки. Однако, указанная интеграция требует капитальных вложений и последующих затрат на обслуживание системы.

Внедрение смарт-контрактов, основанных на технологии блокчейн, обуславливает следующее:

- сокращает число участников логистической цепочки;
- ускоряет документооборот за счет использования цифровых сертификатов;
- снижает издержки на посредниках.

Реализация и внедрение комплексного программного решения позволяет:

- управлять собственными активами (контейнерами, вагонами, многооборотной тарой);
- вести учет контейнерных перевозок и отслеживание контейнеров в пути и на терминалах;
- существенно сокращать персонал, занимающийся документооборотом;
- оперативно находить звено, в котором допущена ошибка;
- сокращать издержки из-за потери или хищения;
- сокращать число судебных разбирательств [1–3].

1 августа 2024 года в России начался эксперимент по использованию национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП). Одним из активных участников эксперимента является компания АО «Евросиб СПб-транспортные системы». Применение блокчейна рассматривается на примере указанной компании.

ХОЛОДИЛЬНАЯ ЦЕПЬ: СЕРВИС УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА

Наблюдается ежегодный отток объемов перевозок скоропортящейся продукции с железнодорожного на автомобильный транспорт. Перевозка в рефрижераторных вагонах допускает разрыв непрерывной холодильной цепи, что приводит к несоблюдению требуемых температурных условий, и, как следствие, к потере качества замороженной продукции.

Разработка проекта внедрения технологии блокчейн на примере холодильной цепи позволяет выход на рынок контейнерных перевозок скоропортящихся грузов с технологически новым продуктом «перевозка рефрижераторных контейнеров с выдачей электропитания от ДГК (дизель-генераторный контейнер) без сопровождения поездной бригадой электротехников», в проекте реализуются технические возможности по удаленному мониторингу и управлению ДГК и удаленному мониторингу температурных режимов рефрижераторных контейнеров, подключенных к ДГК [4–6].

Холодильная цепь – это совокупность оборудования и производственных процессов, предназначенных для сохранения скоропортящегося продукта (продовольствие, медикаменты и т.п.) в условиях низких температур на всем протяжении цикла от его производства до потребления (Рис.).



Рис. Холодильная цепь

Fig. Cold chain

Суть предлагаемого нами проекта заключается в разработке системы удаленной диспетчеризации, мониторинга и управления дизель-генераторным контейнером и системы удаленного мониторинга температурных параметров рефрижераторных контейнеров, на примере компании АО «Евросиб СПб – транспортные системы» [7].

Использовать полученные данные можно для:

- онлайн-мониторинга состояния оборудования в пути следования;
- контроля за условиями перевозки скоропортящегося груза на всех этапах мультимодальной цепочки со стороны коммерческих служб;
- контроля за условиями перевозки груза со стороны клиента.

Рассмотрим ключевые моменты проекта:

- возможность выполнения рефрижераторных перевозок в рамках нового технологического продукта;
- подтверждение или продажа клиентам высокого уровня оказания услуги при перевозке грузов, требующих соблюдения температурного режима;
- получение добавленной стоимости от предоставления дополнительной услуги удаленного сопровождения состояния груза (либо управление риском оператора при коммерческой ответственности за груз);
- новый технологический продукт позволит перевозить в 2 раза больше рефрижераторных контейнеров при том же количестве платформ (два рефрижераторных контейнера на платформу вместо одного);
- использование в проекте платформ повышенной грузоподъемности (мод. 13-6903) дает возможность перевозки тяжелых грузов (замороженные мясо, рыба, полуфабрикаты и прочее) также

по два рефрижераторных контейнера на платформу, что увеличивает коммерческую привлекательность сервиса.

Реализация данного проекта осуществляется в два этапа:

- Первый этап: этап реализации рабочего места оператора, отвечающего за контроль состояния оборудования.
- Второй этап: этап предоставления информации о параметрах перевозки коммерческим службам и клиентам.

Первый этап проекта включает в себя:

- внедрение SCADA-системы для мониторинга ДГК;
- получение данных мониторинга ДГК и отправка команд управления со шкафа управления ДГК (через GSM-сеть, через спутник);
- настройку рабочего места оператора: мониторинг и управление ДГК;
- внедрение SCADA-системы для мониторинга электронных пломб (ЭЗПУ);
- получение данных мониторинга с электронных пломб с сервера «Позитрон» (или сервера АО Глонасс);
- рабочее место для постановки или снятия рефрижераторных контейнеров на мониторинг (а также передача моментов постановки или снятия с мониторинга на сервер «Позитрон»), задания нормативных условий перевозки, привязки рефрижераторных контейнеров к сцепам или ДГК;
- настройку рабочего места оператора: мониторинг температурных параметров рефрижераторных контейнеров, подключенных к ДГК.

Второй этап проекта включает в себя:

- предоставление информации о параметрах перевозки коммерческим службам и клиентам;
- выгрузку данных о температурных параметрах рефрижераторных контейнеров в DataCore;
- доработку DataCore для хранения температурных параметров;
- разработку выгрузки из SCADA в DataCore;
- выгрузку данных о температурных параметрах рефрижераторных контейнеров в личный кабинет клиента;
- разработку соответствующего раздела личного кабинета;
- выгрузку данных из DataCore в личный кабинет.

Далее рассмотрим особенности, которые могут возникнуть в ходе реализации проекта:

- сложность конструкции – требуется большая антенна;
- необходимость профессионального отряда реагирования;

- особенности работы автоматики на борту;
- безлюдная технология – повышение безопасности жизнедеятельности.

При перевозках по железной дороге без сопровождения людей технологией предусмотрена удаленная «тревожная кнопка» (в диспетчерском центре) для принятия мер по недопущению выхода продукции из холодовой цепи. Для надежности ее функционирования нужна надежная связь по всей стране.

Перечень нормативных документов, необходимых для реализации проекта:

- ФЗ № 166 от 20.12.2004 «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» [8];
- ЕАЭС ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» [9];
- ТР ЕАЭС 040/2016 «О безопасности рыбы и рыбной продукции» от 18.10.2016 г., в РФ с 01.09.2017 г. (сейчас ГОСТ 32366-2013 Рыба мороженая. Технические условия) [10];
- Постановление правительства РФ №314 от 15.04.2014 Государственная программа Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса» [11];
- Приказ Минсельхоза России от 20.04.2017 N 189 «Об утверждении Стратегии развития морских терминалов для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота с учетом береговой логистической инфраструктуры, предназначенной для транспортировки, хранения и дистрибуции рыбной продукции» [12];
- ФЗ № 29 «О качестве и безопасности пищевых продуктов» [13];
- ПРИКАЗ МинСельХоз от 17 июля 2014 г. N 281 «Об утверждении правил организации работы по оформлению ветеринарных сопроводительных документов и порядка оформления ветеринарных сопроводительных документов в электронном виде» [14];
- Правила перевозок скоропортящихся грузов;
- Договор между сторонами.

СОДЕРЖАНИЕ И ЭТАПЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН И СМАРТ-КОНТРАКТОВ

Для реализации проекта следует выделить следующие этапы внедрения блокчейна:

- оценка возможности внедрения блокчейна в компанию.

На данном этапе требуются следующие данные о компании – число сотрудников, обороты, отрасль, длина производственного цикла,

число клиентов, наличие гарантийных сроков и условий обслуживания. На основании этих данных, программисты обрабатывают полученные данные и производят расчет сроков внедрения блокчейн-технологий в компании, его стоимости, экономической эффективности и рисках. На основании полученного блокчейн анализа предприятие принимает решение о необходимости внедрения технологии [15].

- разработка блокчейн системы для компании.

На данном этапе компания может воспользоваться двумя опциями. Первая – в настоящее время разработаны блокчейн-алгоритмы для каждой отрасли и для каждого размера компании, которые можно будет использовать для адаптации на уровне конкретной организации. Наличие готового ядра программы позволяет снизить затраты на внедрение до 70% и ускорить процесс внедрения блокчейн технологий. Вторая – адаптация алгоритма по заказу компании. В таком случае компания предоставляет всю информацию о требуемой блокчейн системе администрации платформы, которая в дальнейшем адаптирует существующие шаблоны для отдельного предприятия. Выбор необходимой опции осуществляется руководством компании исходя из интересов руководства, специфики работы и уровня конфиденциальности информации.

- внедрение блокчейн системы в работу компании.

На данном этапе производится запуск системы и оценка ее эффективности. Осуществляется ее доработка в рамках выявленных недостатков или возможностей улучшения.

- мониторинг реализации блокчейн технологии.

Компания, осуществляющая внедрение технологии распределенного реестра, ежемесячно формирует отчет о ходе реализации блокчейн системы. На основании этого отчета формируются рекомендации по улучшению блокчейн-системы и их экономическое обоснование.

- участие компании в блокчейн сообществе через обобщение результатов внедрения и обмен информацией с компаниями партнерами в рамках своей отрасли или смежных сфер деятельности.

В интересах промышленного предприятия и холдинга имеет место использовать блокчейн-консорциум (от англ. Consortium или Public Permissioned blockchain) – это такие блокчейны, к которым каждый может подключиться для просмотра, но добавлять информацию или подключить свой узел участник может только с разрешения других участников. Такие блокчейны строят организации с целью повышения доверия со стороны заказчиков, потребителей продукции или общества в целом.

Далее оценивается экономическая эффективность внедрения технологии блокчейн для компании на примере холодильной цепи, рассчитываются капитальные затраты на внедрение системы и определяется срок окупаемости проекта.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Расчет капитальных затрат на внедрение системы

Капитальными затратами в этом проекте являются расходы на закупку программного обеспечения, WEB-версии технологии блокчейн и смарт-контрактов, интегрирование новой системы и действующих технологий, а также покупка и обслуживание серверов для данных.

$$K = K_{\text{раз}} + K_{\text{инт}} + K_{\text{серв}}, \text{ млн руб.}, \quad (1)$$

где $K_{\text{раз}}$ – стоимость разработки системы блокчейн, $K_{\text{раз}} = 90$ млн руб.; $K_{\text{инт}}$ – стоимость интегрирования системы блокчейн и действующих систем, $K_{\text{инт}} = 13,9$ млн руб.; $K_{\text{серв}}$ – стоимость серверов для хранения данных, $K_{\text{серв}} = 17$ млн руб.

Тогда $K = 90 + 13,9 + 17 = 0,12$ млрд руб.

Таким образом, величина капитальных вложений внедрения технологии блокчейн составляет 0,12 млрд рублей.

Оценка экономического эффекта от реализации внедрения технологии блокчейн и смарт-контрактов

За счет внедрения технологии блокчейн сокращаются эксплуатационные расходы за счет уменьшения времени простоя вагонов. Простой вагонов сокращается за счет ускорения проверки и обработки документов, сокращения временных затрат на погрузочно-разгрузочные операции и автоматизации бизнес-процессов в документообороте и грузовых операций.

Внедрение технологии блокчейн позволяет не только производить онлайн-мониторинг состояния оборудования в пути следования, но и снизить перепростой рефрижераторных вагонов по прибытию и по отправлению, высвободить маневровые тепловозы, занятые доставкой документов.

Рассмотрим среднестатистическую станцию N, используемую компанией «Евросиб».

Экономия вагоно-часовой работы определяется по формуле:

$$\Delta \text{Энт} = \Delta \text{нтрод} \cdot e(\text{ваг-ч}) \text{ руб.}, \quad (2)$$

где $\Delta \text{нтрод}$ – экономия вагоно-часов в году; $e(\text{ваг-ч})$ – ставка 1 вагоно-ч грузовых вагонов, руб/ваг-ч (24,75 руб.).

Экономия вагоно-часов в год определяется по формуле:

$$\Delta \text{нтрод} = (\Delta \text{нтсут} \cdot 365), \quad (3)$$

где нтсут – экономия вагоно-часов в сутки.

Экономия вагоно-часов в сутки определяется по формуле:

$$\text{нтсут} = (\Delta t_1 \cdot m_1 + \Delta t_2 \cdot m_2) \cdot 2N, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – изменение времени простоя рефрижераторных вагонов после внедрения технология блокчейн (по прибытию 0,3 ч, по отправлению 0,22ч); m_1, m_2 – количество вагонов в составе поезда (по прибытию 60 ваг, по отправлению 55 ваг.); N – среднее количество пар поездов в сутки, $N = 8$ пар.

Тогда $\Delta \text{нтсут} = (0,3 \cdot 60 + 0,22 \cdot 55) \cdot 2 \cdot 8 = 464$ вагоно-ч;

Тогда $\Delta \text{нтрод} = (464 \cdot 365) = 169360$ вагоно-ч;

Тогда $\Delta \text{Энт} = (169360 \cdot 24,75) = 4191,66$ тыс. руб.

Экономия эксплуатационных расходов от снижения потерь при неиспользовании маневровых тепловозов определяется по формуле:

$$\Delta \text{ЭМ} = \Delta \text{Мтрод} \cdot e(\text{ман.лок-ч}) = 29,2 \cdot 583,5 = 17038,2 \text{ руб.}, \quad (5)$$

где $\Delta \text{Мтрод}$ – время использования маневрового локомотива для доставки документов в год, ч.; $e(\text{ман.лок-ч})$ – расходная ставка тепловоза парка «Евросиб», $e(\text{ман.лок-ч}) = 583,5$ руб.

Внедрение технологии блокчейн и смарт-контрактов позволяет сократить сумму выплат по исковым требованиям и в целом уменьшает количество исков за счет «прозрачности» системы. Также данные технологии помогут избежать нарушения сроков доставки грузов, что позволит сократить затраты на выплату исков.

Предложенная технология позволит сократить затраты на исковые выплаты на 50%.

Экономия затрат на выплаты по исковым требованиям определяется по формуле:

$$\Delta \text{Эи} = \text{Зср} * \text{кэ} \text{ тыс. руб.}, \quad (6)$$

где Зср – среднегодовые затраты на выплаты по исковым требованиям по «Евросиб»; $\text{Зср} = 15875,42$ тыс. руб.; кэ – коэффициент эффективности от внедрения технологии, $= 0,5$.

Тогда $\text{Э(и)} = 15875,42 * 0,5 = 7937,71$ тыс руб.

Таким образом, годовой экономический эффект определяется по формуле:

$$\text{Э} = \Delta \text{Энт} + \Delta \text{Эм} + \Delta \text{Эи}, \quad (7)$$

Тогда $\text{Э} = 4191,66 + 17038,2 + 7937,71 = 29167,57$ тыс. руб.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии блокчейн и смарт-контрактов составляет 29,17 миллионов рублей.

Оценка экономического эффекта, достигаемая за счет прироста прибыли

Внедрение технологии блокчейн и смарт-контрактов дает не только такой экономический эффект, как экономия средств, а также помогает получить больше прибыли за счет снижения простоя и увеличения грузооборота в год.

Время оборота состава до изменения – 5,14 суток.

Время оборота состава после изменения – 4,87 суток.

$5,14/4,87 = 1,055$ – рост производительности при грузоперевозках

Показатель грузооборота на станции N за год:

$\sum \text{Р1} = 36457,78$ млн. т-км.

Изменение грузооборота в год:

$\Delta \text{Р1} = 0,055 * 36457,78 = 2005,2$ млн т-км.

Прирост прибыли ($\Delta \text{П}$) в связи с сокращением простоя рассчитывается по формуле:

$$\Delta \text{П} = \Delta \text{Р1} * \text{е} * \text{R} * \alpha, \quad (8)$$

где $\Delta\P$ – прирост чистого дохода, руб.; ΔP_1 – изменение грузооборота в год, млн; e – средняя доходная ставка, руб./т-км; R – средний показатель рентабельности по доходам; α – коэффициент территориальной принадлежности.

Тогда $\Delta\P = 2005,2 * 7 * 0,102 * 0,02 = 28,63$ млн руб.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии блокчейн и смарт-контрактов, получаемый за счет прироста прибыли составляет 28,63 миллионов рублей.

Определение периода окупаемости

Период срока окупаемости определяется по формуле:

$$\text{Ток} = K / (\Delta\P + \Delta P_1) \quad (9)$$

Тогда $\text{Ток} = 0,12 \text{ млрд} / (29,17 \text{ млн} + 28,63 \text{ млн}) = 2,1$ года.

Таким образом, в результате расчетов получено, что срок окупаемости внедрения технологии блокчейн и смарт-контрактов составляет 2,1 года. Это означает, что данный проект является экономически эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации проекта внедрения технологии блокчейн на примере холодильной цепи важны установленные стандарты содержания скоропортящихся грузов, систематизированные и стандартизированные данные и общие протоколы обмена данных, а также общие стандарты обмена данных и описания требований к каждому элементу цепи.

Ближайшие шаги, которые необходимо сделать для реализации внедрения технологии блокчейн на примере холодильной цепи:

1. Подготовка нормативных инициатив: поправки к техническому регламенту ЕврАзЭС, требований к соответствию транспортных средств, тары и инфраструктуры, а также предложений по тарифам.
2. Разработка ИТ-средств контроля температурной цепочки и статуса груза по всей логистической цепочке.
3. Сертификация оборудования и операционная подготовка сервисов.
4. Составление схемы-графика поездных отправок с рыбопродукцией и прочими СПГ.

5. Получение тарифной скидки в целях консолидации грузопотока и для привлечения активов сторонних собственников.
6. Разработка грамотных стратегии и политики при работе с подрядчиками.

В связи с созданием НЦТЛП применение технологии блокчейн на примере холодильной цепи важно для повышения эффективности логистических операций. Это снижает эксплуатационные затраты, ускоряет доставку за счет сокращения времени на оформление документов, минимизирует риски и контролирует движение грузов на всех этапах перевозки.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The author state that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фёдорова М.В. Внедрение технологии блокчейн в работу АО «Евросиб СПб – транспортные системы» В кн.: Сборник научных статей международной научно-практической конференции в рамках российско-германского перекрестного года «Экономика и устойчивое развитие 2020–2022». 3 декабря 2021 года; СПб. Под ред. Журавлевой Н.А. Киров: ООО «МЦНИП», 2021. С. 212–218.
2. Перспективы использования технологии блокчейн. Дата обращения: 01.03.2024. Режим доступа: https://index1520.com/upload/medialibrary/e7b/Blockchain_2019_12_12.pdf
3. Кейсы использования блокчейн. Дата обращения: 03.03.2024. Режим доступа: <https://merehead.com/ru/blog/maersk-blockchain-use-cases/>
4. Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Стратегия_цифровой_трансформации_РЖД
5. Технологии распределенного реестра. Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: https://cdto.wiki/Технологии_распределенного_реестра
6. Развитие технологии распределенного реестра. Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: [https://cbr.ru/Content/Document/File/50678/Consultation_Paper_171229\(2\).pdf](https://cbr.ru/Content/Document/File/50678/Consultation_Paper_171229(2).pdf)
7. Официальный сайт компании АО «Евросиб СПб-ТС». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: <http://www.eurosib.biz/ru/>
8. Федеральный закон Российской Федерации №166-ФЗ от 20 декабря 2004 г. «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50799/

9. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 (с изменениями на 25 ноября 2022 года) «О безопасности пищевой продукции». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320560>
10. Технический регламент Евразийского экономического союза (ТР ЕАЭС 040/2016) «О безопасности рыбы и рыбной продукции». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: <https://mosrst.ru/wp-content/uploads/2020/02/tr-eaes-040-2016.pdf>
11. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 314 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70644222/>
12. Приказ Министерства сельского хозяйства России от 20.04.2017 N 189 «Об утверждении Стратегии развития морских терминалов для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота с учетом береговой логистической инфраструктуры, предназначенной для транспортировки, хранения и дистрибуции рыбной продукции». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/otraslevaya_deyatelnost/ekonomika_otrasli/prikaz_mcx_200417_189.pdf
13. Федеральный закон Российской Федерации №29-ФЗ от 02 января 2000 г. «О качестве и безопасности пищевых продуктов». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_25584/
14. Приказ Минсельхоза России (Министерство сельского хозяйства РФ) от 17 июля 2014 г. № 281 «Об утверждении Правил организации работы по оформлению ветеринарных сопроводительных документов и Порядка оформления ветеринарных сопроводительных документов в электронном виде». Дата обращения: 02.03.2024. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70602530/>
15. Ли Бинчжан. Организация грузовых перевозок в транспортных узлах с применением цифровых технологий (на примере порта Шанхай, КНР): дисс. канд. техн. наук. Орел; 2022.

REFERENCES

1. Fedorova MV. Vnedreniye tekhnologii blokcheyn v rabotu AO «Yevrosib SPb – transportnyye sistemy» In: Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh rossiysko-germanskogo perekrestnogo goda «Ekonomika i ustoychivoye razvitiye 2020–2022». 3 dekabrya 2021 goda; SPb. Pod red. Zhuravlevoy N.A. Kirov: ООО «MTSNIP»; 2021:212–218.
2. Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologii blokcheyn. [Internet]. [cited 2024 March 01]. Available from: https://index1520.com/upload/medialibrary/e7b/Blockchain_2019_12_12.pdf (In Russ.)
3. Keysy ispol'zovaniya blokcheyn. [Internet]. [cited 2024 March 03]. Available from: <https://merehead.com/ru/blog/maersk-blockchain-use-cases/>. (In Russ.)

4. Strategiya tsifrovoy transformatsii OAO «RZHD». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Стратегия_цифровой_трансформации_РЖД (In Russ.)
5. Tekhnologii raspredelennoy reyestra. [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: https://cdto.wiki/Технологии_распределенного_реестра (In Russ.)
6. Razvitiye tekhnologii raspredelennoy reyestra. [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: [https://cbr.ru/Content/Document/File/50678/Consultation_Paper_171229\(2\).pdf](https://cbr.ru/Content/Document/File/50678/Consultation_Paper_171229(2).pdf) (In Russ.)
7. Ofitsial'nyy sayt kompanii AO «Yevrosib SPb-TS». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: <http://www.eurosib.biz/ru/> 11.11.2023 (In Russ.)
8. Federal Law of Russian Federation № 166-F3 of 20 December 2004. “O rybolovstve i sokhraneni vodonnykh biologicheskikh resursov”. [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_50799/ (In Russ.)
9. Technical Regulations of the Customs Union TR CU 021/2011 On food safety (as amended as of November 25, 2022). “O bezopasnosti pishchevoy produktsii”. [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/902320560> (In Russ.)
10. Technical Regulations of the Eurasian Economic Union (EAEU TR 040/2016). “O bezopasnosti ryby i rybnoy produktsii”. [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: <https://mosrst.ru/wp-content/uploads/2020/02/tr-eaes-040-2016.pdf> (In Russ.)
11. Decree of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 N 314 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii “Razvitiye rybokhozyaystvennogo kompleksa». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: <https://base.garant.ru/70644222/> (In Russ.)
12. Order of the Ministry of Agriculture of Russia dated April 20, 2017 N 189 «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya morskikh terminalov dlya kompleksnogo obsluzhivaniya sudov rybopromyslovogo flota s uchetom beregovoy logisticheskoy infrastruktury, prednaznachennoy dlya transportirovki, khraneniya i distributsii rybnoy produktsii». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/documents/otraslevaya_deyatelnost/ekonomika_otrasli/prikaz_mcx_200417_189.pdf (In Russ.)
13. Federal Law of Russian Federation № 29-F3 of 02 January 2000. «O kachestve i bezopasnosti pishchevykh produktov». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_25584/ (In Russ.)
14. Order of the Ministry of Agriculture of Russia (Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated July 17, 2014 No. 281) «Ob utverzhdenii Pravil organizatsii raboty po oformleniyu veterinarnykh soprovoditel'nykh dokumentov i Poryadka oformleniya veterinarnykh soprovoditel'nykh dokumentov v elektronnom vide». [Internet]. [cited 2024 March 02]. Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70602530/> (In Russ.)
15. Li Binchzhan. Organizatsiya gruzovykh perevozok v transportnykh uzlakh s primeneniym tsifrovyykh tekhnologiy (na primere porta Shankhay, KNR) [dissertation]. Orel; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторе:

Фёдорова Мария Владимировна, кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Менеджмент и маркетинг»;
eLibrary SPIN: 1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;
E-mail: tale19quale@mail.ru

Information about the author:

Maria V. Fedorova, Candidate of Sciences in Economics,
Associate Professor of the Department of Management and Marketing;
eLibrary SPIN: 1518-7831; ORCID: 0000-0003-2740-573X;
E-mail: tale19quale@mail.ru