

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 10 | № 4 | 2024

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Титова Тамила Семёновна

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Смирнов Сергей Александрович

Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок имени А.А. Зайцева ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Никитин Виктор Валерьевич

д.т.н., профессор, профессор кафедры «Электротехника и теплоэнергетика», профессор кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Богданов Александр Владимирович, д.физ.-мат.н., профессор СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия;
Валинский Олег Сергеевич, к.т.н., ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
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 Паняливатского 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. 10 | Issue 4 | 2024

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Tamila S. Titova

Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Scientific Work PGUPS,
Honored Worker of Science of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

Deputy EDITOR-IN-CHIEF

Sergey A. Smirnov

Director A.A. Zaitsev Scientific-Educational center of passenger railway
transportation innovative development PGUPS, St. Petersburg, Russia

THE SCIENTIFIC EDITOR

Viktor V. Nikitin

Dr.Sc., Professor, Professor Departments Electric Power Traction and Theoretical Bases
of Electrical Engineering PGUPS, St. Petersburg, Russia

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksandr V. Bogdanov, Dr. Physics and Mathematics, Professor, St. Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia;

Oleg S. Valinsky, Ph.D., rector PGUPS, St. Petersburg, Russia;

Vladimir D. Vereskun, Dr. Sc., Professor, Rector of Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don, Russia;

Aleksandr A. Vorobyev, Dr. Sc., Associate professor, Head of Department Mechanical Handling and Road
Building Machines, Professor Electric Power Traction PGUPS, St. Petersburg, Russia;

Natal'ya A. Zhuravleva, Dr. Economics, Professor Head of the Department of Economics of Transport,
Director of the Institute of Applied Economics and Accounting of Railway Transport PGUPS, St. Petersburg,
Russia;

Johannes O. Kluehspies, 2nd Dr.'s Degree, Full Professor at Deggendorf Institute of Technology,
Munich, Germany;

Vladimir Kolesnikov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor, the President
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;

Irina Kruchinina, Dr.Sc., Director of Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia;

Weili Li, Ph.D., Professor, Beijing Jiaotong University, Beijing, China;

Guobin Lin, PhD, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center (NMTC), Director,
Professor, Tongji University, Shanghai, China ;

Aleksandr P. 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 – Электротехнические комплексы и системы

Лисов А.А., Возмилов А.Г., Гундарев К.А.

Выбор архитектуры нейронной сети для электронной дифференциальной системы электроавтомобиля446

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Ким К.К., Королева Е.Б., Рыбин П.К., Степанская О.А.

Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока.....463

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

Максимов В.А.

Современное состояние вопроса о применении технологии «компакт-асфальт»477

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Техносферная безопасность

Завьялов А.Б., Глухих Т.В.

Совершенствование качества обслуживания малоподвижных групп населения на железнодорожном транспорте путем устранения дополнительных барьеров в процессе выбора ими поездов489

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электрофизика, электрофизические установки

Кузнецов А.А., Пономарев А.В., Горлов А.В., Волчанина М.А.

Применение вейвлет-преобразования для распознавания акустических сигналов различных дефектов силовых трансформаторов504

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Баканова Е.И., Незевак В.Л., Сидоров О.А.

Моделирование режимов работы устройств накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока.....517

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

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

Численное 3D моделирование магнитных систем на основе замкнутых сверхпроводящих колец537

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

Рыжова Е.Л., Осипов В.Ю.

Применение технических средств диагностирования тяговых двигателей подвижного состава556

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Попов И.П.

Балка с повышенной несущей способностью для мостовых пролетных строений.....577

СОДЕРЖАНИЕ

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А.

К вопросу об оптимизации пуска в ход линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента587

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Вашлаев И.И. Михайлов А.Г., Зуев А.Е.

Оптимизация грузопотоков горной массы при веерной отработке месторождения.....598

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Замота Т.Н., Лошаков А.С., Турушина Е.В.

Оценка потока отказов транспортных средств по изменению параметра израсходованного ресурса618

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Журавлева Н.А., Крюкова Т.А., Новикова Е.В.

Расчет показателей объемов и структуры перевозок грузов железнодорожным транспортом в границах Северо-Западного полигона ОАО «РЖД» в условиях смещения цепей поставок630

CONTENTS

REVIEWS

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Lisov A.A., Vozmilov A.G., Gundarev K.A.

Choosing of neural network architecture for electronic differential system of electric vehicle.....446

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Kim K.K., Koroleva E.B., Rybin P.K., Stepanskaya O.A.

An unmanned aerial vehicle for monitoring an AC contact network463

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

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

Maksimov V.A.

Current state of the issue on the use of compact asphalt technology.....477

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Technosphere safety

Zavyalov A.B., Gluhih T.V.

Improving the quality of service for persons with reduced mobility on railway transportation by eliminating additional barriers in the process of their choice of trains489

ORIGINAL STUDIES

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrophysics, electrophysical installations

Kuznetsov A.A., Ponomarev A.V., Gorlov A.V., Volchanina M.A.

Application of wavelet transform for recognition of acoustic signals of various defects of power transformers504

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Bakanova E.I., Nezevak V.L., Sidorov O.A.

Modeling of operating modes of electric power storage devices in AC traction power supply systems.....517

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

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

Numerical 3D modeling of magnetic systems based on closed superconducting rings537

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Ryzhova E.L., Osipov V.Yu.

The use of technical means for diagnosing traction engines of rolling stock556

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Popov I.P.

Beam with increased bearing capacity for bridge span structures.....577

CONTENTS

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Rolling stock of railways, train traction and electrification

Solomin V.A., Solomin A.V., Chekhova A.A., Zamshina L.L., Trubitsina N.A.

On the question of optimizing the start-up of a linear induction motor
with an adjustable resistance of the short-circuited winding of the secondary element587

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Vashlaev I.I., Mikhailov A.G., Zuev A.T.

Optimization of mine mass cargo flows during fan mining of the field.....598

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Ground transport and technological means and complexes

Zamota T.N., Loshakov A.S., Turushina E.V.

Assessment of the failure rate of vehicles by changing the parameter of the consumed resource.....618

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Zhuravleva N.A., Kryukova T.A., Novikova E.V.

Calculation of indicators of volumes and structure of cargo transportation
by rail within the boundaries of the North-West polygon of JSC Russian Railways
in the context of shifting supply chains.....630

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst635379>

© А.А. Лисов, А.Г. Возмилов, К.А. Гундарев

Южно-Уральский государственный университет

(Челябинск, Россия)

ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОАВТОМОБИЛЯ

Цель. Исследование вариантов архитектур нейронных сетей для реализации электронно-дифференциальной системы электроавтомобиля.

Материалы и методы. Основными методами исследования в настоящего исследования являются методы сравнительного анализа и поиска наиболее рациональной архитектуры нейронной сети (НС) для работы с числовыми данными, структурированными в виде массива.

Результаты. В результате анализа выяснилось, что наиболее рациональным вариантом является нейронная сеть глубокого обучения, а в перспективе дальнейшего развития данной работы, после экспериментального подтверждения, может быть применена и рекуррентная нейронная сеть.

Заключение. В заключении отражаются ранее, полученные результаты и вывод о невозможности достижения поставленной цели при применении сверточных нейронных сетей, больших языковых моделей, случайно-векторных функциональных сетей связи и радиально-базисных функциональных НС.

Ключевые слова: электроавтомобили; электронный дифференциал; архитектуры нейронных сетей; нейронные сети.

Как цитировать:

Лисов А.А., Возмилов А.Г., Гундарев К.А. Выбор архитектуры нейронной сети для электронной дифференциальной системы электроавтомобиля // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 446–462. doi: 10.17816/transsyst635379

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.A. Lisov, A.G. Vozmilov, KA. Gundarev

South Ural State University

(Chelyabinsk, Russia)

CHOOSING OF NEURAL NETWORK ARCHITECTURE FOR ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE

Aim. To study various network architecture options for implementing an electronic differential system in an electric vehicle.

Materials and Methods. The study primarily used comparative analysis to identify the most rational neural network (NN) architecture for processing numerical data structured as arrays.

Results. The analysis revealed that a deep learning neural network is the most effective choice. For future developments, and after experimental confirmation, a recurrent neural network could also be a viable option.

Conclusion. The study confirmed that achieving the desired goal is not feasible using convolutional neural networks, large language models, random vector functional communication networks and radial-basis functional NNs.

Keywords: electric vehicles; electronic differential; neural network architectures; neural networks.

To cite this article:

Lisov AA, Vozmilov AG, Gundarev KA. Choosing of neural network architecture for electronic differential system of electric vehicle. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):446–462. doi: 10.17816/transsyst635379

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье подробно рассмотрен процесс выбора архитектуры для искусственной нейронной сети (ИНС), являющейся ядром системы электронного дифференциала (ЭД) с учётом ранее опубликованного исследования [1].

Выбор архитектуры НС для реализации электронно-дифференциальной системы является критическим параметром для успешной реализации поставленной задачи. В статье рассмотрены практические и научно-технические способы применения наиболее распространённых вариантов НС, а именно: нейронной сети глубокого обучения, рекуррентной нейронной сети, сверточной нейронной сети, радиально-базисной НС и др.

НС в виду своей гибкости может учитывать многочисленные факторы, влияющие на характер движения транспортного средства, такие как: погодные условия, состояние дорожного покрытия, характер вождения, специфичные особенности конкретной модели автомобиля. В настоящее время использование НС стало активной областью исследований в силовой электронике и приводе электродвигателей. Из-за их адаптивных способностей в процессе обучения, применение ИНС для идентификации систем и динамики управления стало многообещающей альтернативой для существующих систем управления [2]. НС могут применяться для управления и идентификации нелинейных систем, поскольку они аппроксимируют любую желаемую степень точности с помощью широкого спектра нелинейных моделей [3].

При практическом проектировании таких систем важнейшими характеристиками данных алгоритмов являются:

- 1) устойчивость системы к артефактам измерения или внешним возмущениям [4];
- 2) устойчивость к дрейфу распределения данных [5];
- 3) аспекты безопасности и защищенности [6];
- 4) способность дополнять человеческий опыт при принятии решений [7];
- 5) возможность показать пользователю интересные корреляции, которые он обнаружил в массиве анализируемых данных [8];
- 6) способность оценивать достоверность собственных предсказаний с высокой точностью [9].

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Структура Электронного Дифференциала

Ранее в статье [1] был рассмотрен (Рис. 1) общий принцип построения системы для сбора показаний датчиков скорости, гироскопа, акселерометра и угла поворота рулевой рейки. Полученные данные при этом представляются в структурированном числовом формате (пример можно посмотреть на Git Hub, пользователь – «AnLiMan», репозиторий – «Electronics_Differential_System»). Этот аспект с одной стороны накладывает ограничения на диапазон применимых решений, например, невозможность применения больших языковых моделей, с другой, позволяет проще выбрать наиболее подходящий вариант архитектуры.

1.2. Обзор архитектур нейронных сетей

На Рис. 2а показана общая концепция архитектуры ИНС. Узлы НС организованы в линейные массивы, называемые слоями (layers). Обычно есть входной слой (input layer), выходной слой (output layer) и скрытые слои (hidden layers), при этом скрытых слоев может быть от одного (перцептрон) до нескольких (НС глубокого обучения).

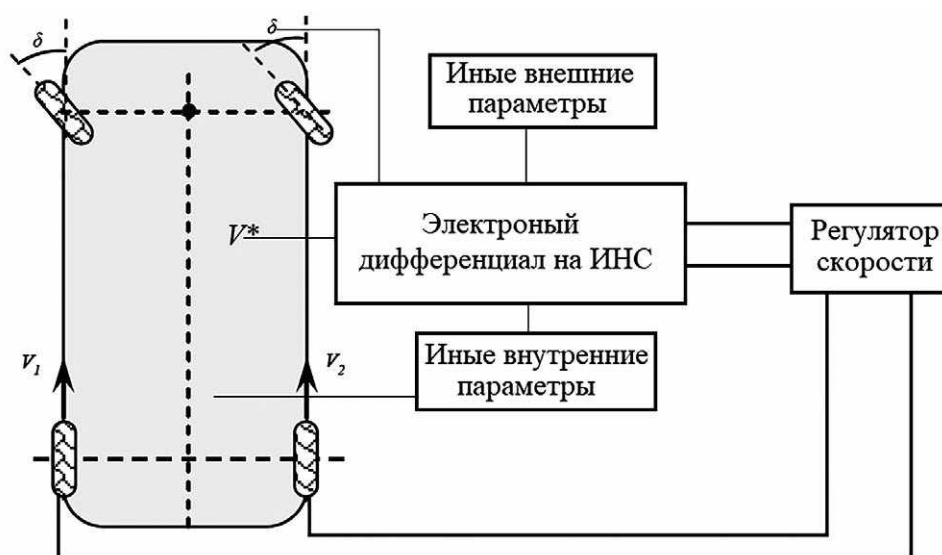


Рис. 1. Структура электронной дифференциальной системы с использованием нейронной сети [1]

Fig. 1. Structure of an electronic differential system using a neural network [1]

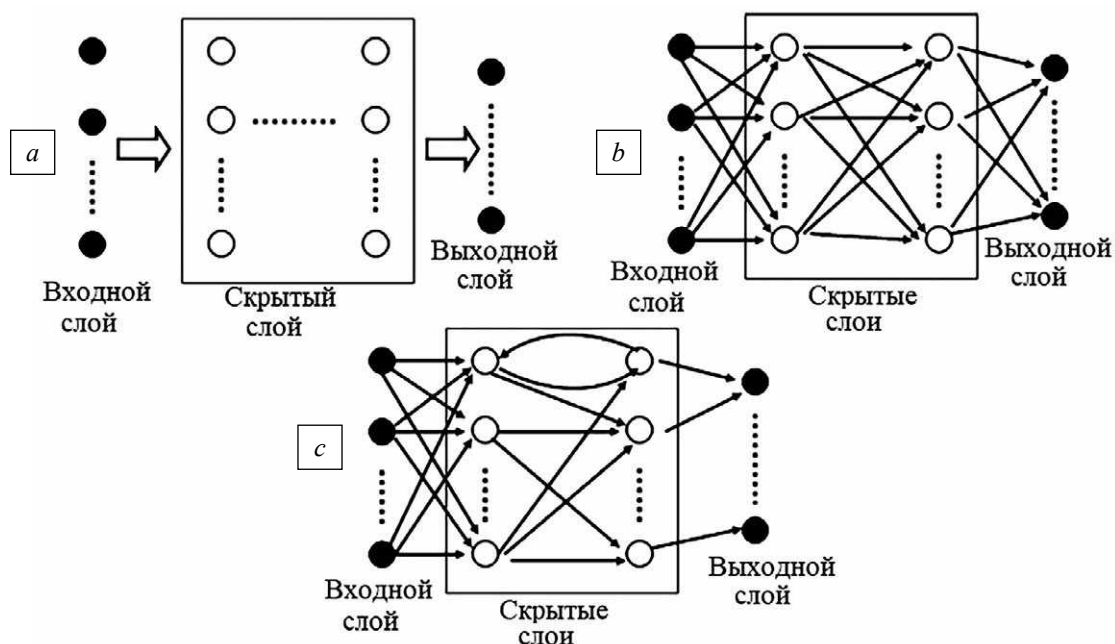


Рис. 2. а) Общая топология ИНС, б) ИНС с прямой связью (персептрон),
в) ИНС с обратной связью

Fig. 2. а) A general topology of ANN, б) Feedforward ANN (perceptron),
в) Feedback ANN

Проектирование топологии сети включает определение количества узлов на каждом слое, количества слоев в сети и пути соединений между узлами. Обычно эти факторы изначально устанавливаются интуитивно, исходя из опыта разработчика, а после оптимизируются с помощью нескольких циклов экспериментов.

Существует два типа соединений между узлами. Один из них – одностороннее соединение без обратной связи. Другой – обратная связь, в которой выход узлов может быть входом для предыдущих или того же уровня узлов. На основе вышеопределенных типов связей, нейронные сети можно разделить на два типа: сеть с прямой связью (feedforward, Рис. 2б) и сеть с обратной связью (feedback, Рис. 2с).

Поскольку сигнал распространяется только в одном направлении, сеть с прямой связью статична; то есть один вход связан с одним конкретным выходом, а сеть с обратной связью динамична. Для одного входа состояние сети обратной связи изменяется в течение многих циклов, пока не достигнет точки равновесия, поэтому один вход производит ряд выходов. По этой причине второй вариант топологии более предпочтителен в более сложных и нелинейных задачах предсказания и классификаций.

1.2.1. Перцептрон

Перцептрон – это сеть прямого распространения и самый ранний тип нейронной сети (Рис. 2а), разработанный Розенблаттом [10]. Перцептрон с одним скрытым слоем имеет свои ограничения: он может решать только линейно разделимые задачи. Классический пример – задача XOR, которую нельзя смоделировать с помощью однослойного перцептрона [11]. Многослойный перцептрон (MLP), как показано на Рис. 2б, является наиболее используемой нейронной сетью. Его можно использовать для аппроксимации любых непрерывных функций. При обучении MLP обычно используется алгоритм обратного распространения ошибки [12], показанный на Рис 2с.

При многослойном перцептроне сначала входные данные распространяются по сети и после этого вычисляются выходные значения. Затем ошибка между вычисленными и правильными (исходными) значениями, называемая функцией стоимости, распространяется обратно от выходных данных к входным данным для корректировки весов. Математически алгоритм минимизирует функцию стоимости с помощью метода градиентного спуска, поэтому его можно применять только к сетям с дифференцируемыми передаточными функциями.

1.2.2 Нейросеть глубокого обучения

Нейросеть глубокого обучения (DNN) представляет собой искусственную нейронную сеть с несколькими скрытыми слоями между входным и выходным слоями, как показано на Рис. 3. Нейронные сети глубокого обучения являются базовой моделью для многих других архитектур, о которых будет сказано далее.

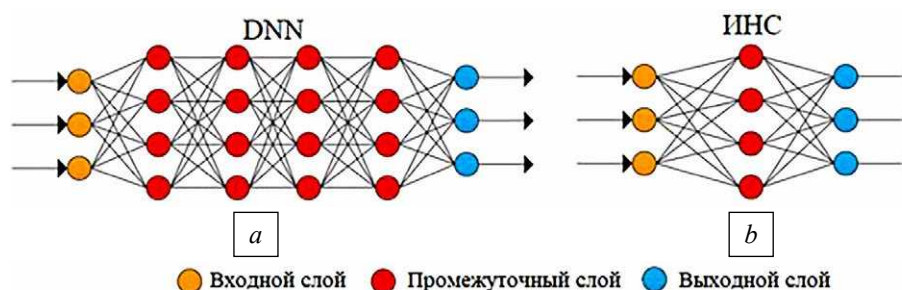


Рис. 3. Архитектуры нейросетей. *a)* глубокого обучения – DNN, *b)* обычная НС (составлено авторами)

Fig. 3. Architectures of neural networks. *a)* DNN, *b)* regular NN

DNN способны моделировать сложные нелинейные зависимости. Архитектуры DNN создают составные модели, в которых объект представлен как многослойная композиция базовых элементов [13]. Использование дополнительных слоев позволяет комбинировать функции из более низких слоев, что может потенциально упростить моделирование сложных данных, требующих меньшего количества нейронов, чем это было бы в случае неглубокой сети с аналогичными характеристиками. Например, исследования показали, что разреженные многомерные полиномы легче аппроксимировать с использованием DNN, чем с помощью обычных нейронных сетей [14].

1.2.3 Рекуррентная нейросеть

Рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network, RNN) – это тип искусственной нейронной сети, которая использует последовательные данные или данные временных рядов. Они базируются на нейронных сетях глубокого обучения и обычно используются для порядковых или временных задач, таких как языковой перевод, обработка естественного языка, распознавание речи и субтитры к изображениям. Рекуррентные нейронные сети отличаются своей «памятью», поскольку они берут информацию из предыдущих входов, чтобы влиять на текущий ввод и вывод. В то время как традиционные DNN предполагают, что входы и выходы независимы друг от друга, то выходные данные рекуррентных нейронных сетей зависят от предшествующих элементов в соответствующей последовательности.

Это делает RNN мощным инструментом для анализа и моделирования временных рядов, текстов, аудиосигналов и других данных, где важна последовательность информации. RNN способны к огромному разнообразию конечных состояний и хаотическому поведению [15]. Хаотические системы являются растущей областью интересов научного сообщества: от синхронизации и инженерного управления [16] до кибербезопасности [17]. Использование, а также изучение этих хаотических систем обусловлены их сложным и непредсказуемым поведением нелинейных и динамических систем.

Языковые модели, построенные на рекуррентных нейронных сетях, в настоящее время встречаются достаточно часто [18]. Цель обработки естественного языка – анализировать, понимать и генерировать последовательности слов, которые люди используют в повседневной жизни.

Рекуррентные НС особенно хороши для использования в приложениях управления и обработки сигналов [19]. Например, многоуровневые цифровые рекуррентные сети (LDRN) могут применяться для решения проблем управления и обработки сигналов [20].

1.2.4. Сверточная нейронная сеть

Convolutional neural networks (сверточная нейронная сеть, CNN) – тип нейронной сети глубокого обучения, которая может принимать на вход изображение и назначать важность различным аспектам/объектам на изображении и иметь возможность отличать одно от другого. Предварительная обработка, необходимая в CNN, намного ниже по сравнению с другими алгоритмами классификации. Они применяются в распознавании изображений и видео, рекомендательных системах [21] классификации изображений, сегментации изображений, анализе медицинских изображений, обработке естественного языка [22], интерфейсах мозг-компьютер [23] и финансовых временных рядах [24].

Компьютерное зрение на основе CNN позволило достичь того, что считалось невозможным в последние несколько столетий, например, распознавание лиц, автономные транспортные средства [2], супермаркеты самообслуживания и интеллектуальное медицинское лечение. CNN – это своего рода нейронная сеть прямого распространения, которая способна извлекать признаки из имеющихся данных с помощью сверточных структур. В отличие от традиционных методов извлечения советующих признаков [25, 26], при использовании CNN нет необходимости извлекать данные признаки вручную.

1.2.5. Другие варианты архитектур и топологий

Большие языковые модели (Large language models) – это тип нейронных сетей глубокого обучения, которые анализировать и создавать текст. Данные модели обучают с использованием больших объемов текстовых данных, что помогает им лучше справляться с такими задачами, как генерация текста [27]. Языковые модели являются основой для многих приложений, применяемых для обработки естественного языка, таких как преобразование речи в текст и анализ настроений. Примеры LLM – ChatGPT [28], LaMDA, PaLM и т.д.

Случайные векторные функциональные сети связей (RVFL, Random Vector Functional Link Networks), структура которых показана на Рис. 4., впервые были предложены в [29]. RVFL – это специальная однослойная нейронная сеть прямого распространения, в которой входной слой напрямую соединен как со скрытым слоем, так и с выходным слоем. Веса между входным слоем и скрытым слоем выбираются случайным образом из диапазона $[-1, 1]$, в то время как веса между входным слоем и выходным слоем и веса между скрытым слоем и выходным слоем получаются с помощью псевдообратного алгоритма Мура-Пенроуза.

В исследовании [30] авторы отметили, что не все веса в RVFL одинаково важны, и нет необходимости итеративно настраивать их все. Кроме того, они продемонстрировали несколько преимуществ RVFL, таких как простая аппаратная реализация, быстрая сходимость, мощная аппроксимационная способность [29] и удовлетворение требований приложений реального времени [31].

До сих пор однослойный скрытый слой RVFL и его варианты широко использовались в реальных приложениях. Некоторые известные приложения включают прогнозирование данных временных рядов, распознавание рукописного текста на английском языке, полуконтролируемое обучение, аппаратную реализацию, прогнозирование условных плотностей вероятности, ансамблевое обучение, распределенное обучение, улучшение сигнала.

Радиально-базисные функциональные НС (RBFNN, Radial Basis Function Neural Networks) впервые были введены Пауэллом [32] для

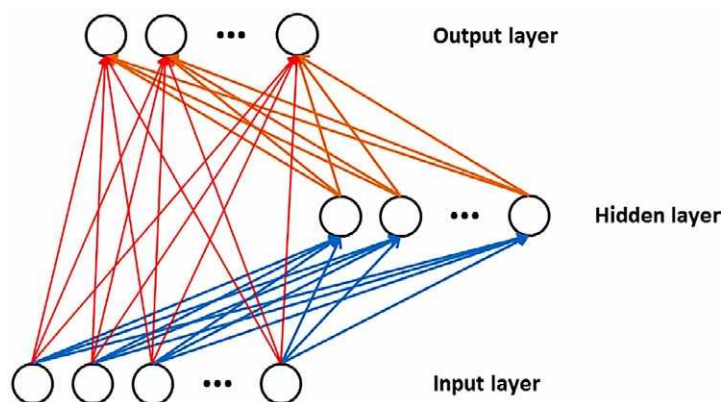


Рис 4. Архитектура RVFL [29]

Fig. 4. The architecture of RVFL [29]

решения проблемы интерполяции в многомерном пространстве, требующем столько же центров, сколько и точек данных. Позже, в исследовании [33], сняли «строгое» ограничение и использовали меньше центров, чем выборок данных, что позволило использовать множество практических приложений RBFNN, в которых количество выборок очень велико. Важной особенностью RBFNN является наличие быстрого линейного алгоритма обучения в сети, способной представлять сложное нелинейное отображение.

Сегодня RBFNN находятся в центре внимания не только в численном анализе, но и в исследованиях машинного обучения. Идея RBFNN вытекает из теории аппроксимации функций. Евклидово расстояние вычисляется от оцениваемой точки до центра каждого нейрона, и радиальная базисная функция (RBF) (также называемая функцией ядра или функцией Гаусса) применяется к расстоянию для вычисления веса (влияния) для каждого нейрона.

Радиальная базисная функция называется так, потому что радиусное расстояние является аргументом функции. Нейронная сеть с радиальной базисной функцией представляет собой трехслойную сеть. Как показано на Рис. 5 [35], слои включают в себя: входной слой, скрытый слой и выходной слой (слой суммирования).

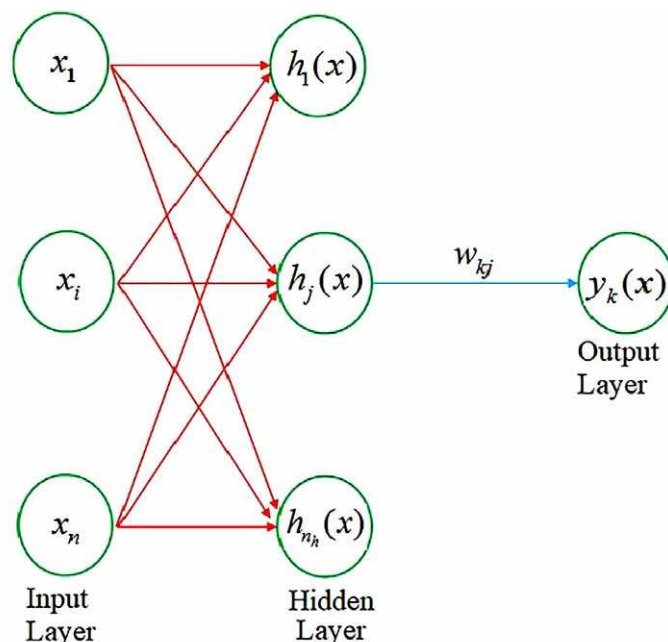


Рис. 5. Архитектура радиально-базисной НС [35]

Fig. 5. Architecture of a radial basis function network [35]

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно вышеизложенного, простейший вариант НС – перцептрон не подойдет для реализации поставленной цели, т.к. обладает малой гибкостью.

Также в качестве ядра системы ЭД не подходят сверточные нейронные сети и большие языковые модели из-за своей специфики работы с изображениями и текстом соответственно.

Схожая с перцептроном ситуация с RVFN, и RBFNN, они содержат только 1 промежуточный слой и имеют крайне специфичную концепцию вычисления весов и соединения между узлами, что помогает решать лишь ограниченный спектр задач.

Как было выяснено выше, нейронная сеть глубокого обучения является базовой моделью для других продвинутых архитектур НС. Они отлично подходят для решения нелинейных систем, могут учитывать незначительные аспекты и зависимости, а также просты в обучении. DNN хорошо подходят для целей предсказания и обучения на числовых данных, которые были получены в ходе исследования [1] и поэтому могут быть использованы в качестве ядра системы ЭД.

Что касается рекуррентных НС, то они могут применяться в более поздних версиях ЭД, в которых будут учитываться погодные условия и характер вождения, однако это можно утверждать только после экспериментального подтверждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с полученными результатами экспериментов наиболее оптимальной моделью является модель DNN (Рис. 6), содержащая минимальное количество конечных параметров и при этом имеет хорошую точность предсказания.

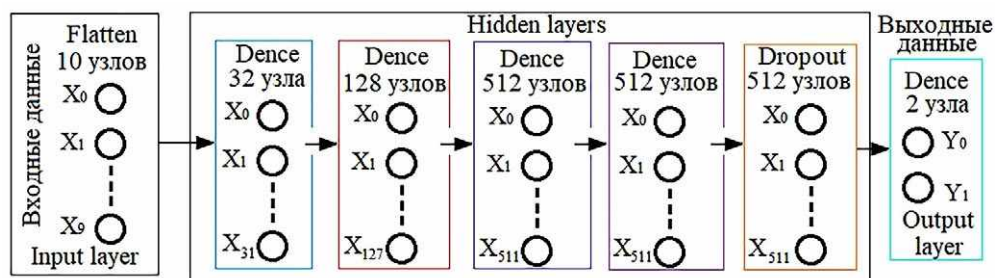


Рис. 6. Архитектура разработанной НС глубокого обучения

Fig. 6. Architecture of the developed deep learning neural network

На Рис. 7 приведены результаты теста точности прогнозирования НС на тестовой выборке из 22 пакетов. Синяя линия (V1) истинное значение из датасета, а зеленая линия предсказанное НС значение V1. Оранжевая линия реальное значение V2, а красная – предсказанное значение V2. Как видно из Рис. 7. НС показывает неплохие результаты даже при столь небольшом размере датасета, т.к. по крайней мере предсказания стремятся к своим образцовым значениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве ядра системы электронно-дифференциальной системы подходит нейронная сеть глубокого обучения, которая является базовой моделью для многих других продвинутых архитектур НС.

Рекуррентные НС могут применены в более поздних версиях ЭД, в которых будут учитываться погодные условия и характер вождения, однако это можно будет утверждать только после экспериментального подтверждения.

Иные варианты рассмотренных нейронных сетей: сверточные нейронные сети, большие языковые модели, RVFN и RBFNN в любом случае, не могут быть использованы в качестве ядра системы ЭД.

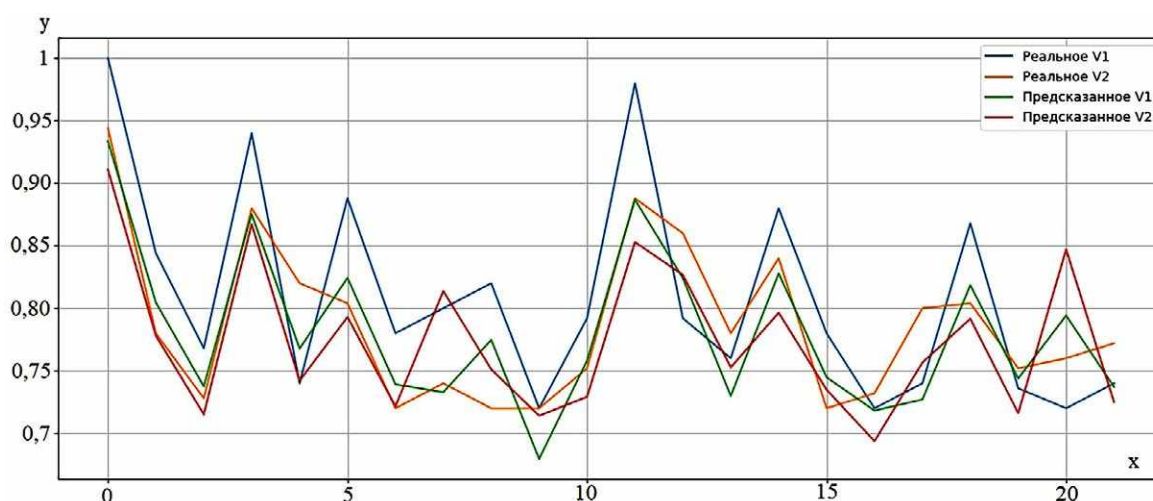


Рис. 7. Графики прогноза модели нейронной сети на тестовой выборке [1]

Fig. 7. Prediction graphs of the neural network model on the test sample [1]

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. 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. Лисов А.А., Кулганатов А.З., Панишев С.А. Акустическое обнаружение транспортных средств аварийных служб с использованием сверхточных нейронных сетей // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 1. С. 95–107. doi: 10.17816/transsyst20239195-107
3. Cirrincione M., Pucci M., Cirrincione G., Capolino G.A. Sensorless control of induction machines by a new neural algorithm: The TLS EXIN neuron // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, N. 1. P. 127–149. doi: 10.1109/TIE.2006.888774
4. Su D, Zhang H, Chen H, Yi J, Chen PY, Gao Y. Is robustness the cost of accuracy? A comprehensive study on the robustness of 18 deep image classification models. // Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV). 2018. P. 631–648.
5. Gama J., Zliobaitė I., Bifet A., et al. A survey on concept drift adaptation // ACM computing surveys (CSUR). 2014. Vol. 46, N. 4. P. 1–37. doi: 10.1145/252381
6. Berkenkamp F., Turchetta M., Schoellig A., Krause A. Safe model-based reinforcement learning with stability guarantees. In: Advances in neural information processing systems. 2017. P. 30.
7. Jarrahi M.H. Artificial intelligence and the future of work: Human-AI symbiosis in organizational decision making // Business horizons. 2018. Vol. 61, N. 4. P. 577–86. doi: 10.1016/j.bushor.2018.03.007
8. Khan J, Wei J.S, Ringner M, et al. Classification and diagnostic prediction of cancers using gene expression profiling and artificial neural networks // Nature medicine. 2001. Vol. 7, N. 6. P. 673–679. doi: 10.1038/89044
9. Nguyen A., Yosinski J., Clune J. Deep neural networks are easily fooled: High confidence predictions for unrecognizable images. In: Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 427–436.
10. Rosenblatt F. Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms. New York: Cornell Aeronautical Lab Inc Buffalo, 1961. AD 256582.
11. Minsky M., Papert S. Perceptrons. An Introduction to Computational Geometry. Cambridge: MIT Press, 1969.
12. Rumelhart D.E, Hinton G.E, Williams R.J. Learning internal representations by error propagation, Parallel Distributed // Explorations in the Microstructures of Cognition. 1986. Vol. 1. P. 318–362.
13. Szegedy C., Toshev A., Erhan D. Deep neural networks for object detection. In: Advances in neural information processing systems. 2013. P. 26.

14. Rolnick D., Tegmark M. The power of deeper networks for expressing natural functions. In: arXiv preprint. 2017. doi: 10.48550/arXiv.1705.05502
15. Serrano-Pérez J.D, Fernández-Anaya G., Carrillo-Moreno S., Yu W. New results for prediction of chaotic systems using deep recurrent neural networks // *Neural Processing Letters*. 2021. Vol. 53. P. 1579–1596. doi: 10.1007/s11063-021-10466-1
16. Bucci M.A, Semeraro O., Allauzen A., et al. Control of chaotic systems by deep reinforcement learning // *Proceedings of the Royal Society A*. 2019. Vol. 475, N. 2231. doi: 10.1098/rspa.2019.0351
17. Chai X., Gan Z., Yuan K., et al. A novel image encryption scheme based on DNA sequence operations and chaotic systems // *Neural Computing and Applications*. 2019. Vol. 31, P. 219–237. doi: 10.1007/s00521-017-2993-9
18. Kombrink S., Mikolov T., Karafiát M., Burget L. Recurrent Neural Network Based Language Modeling in Meeting Recognition // *Interspeech*. 2011. Vol. 11. P. 2877–2880.
19. Hagan M.T., De Jesús O., Schultz R., et al. Training recurrent networks for filtering and control // *Recurrent neural networks: Design and applications*. 1999. P. 311–340.
20. Parlos A.G., Menon S.K., Atiya A. An algorithmic approach to adaptive state filtering using recurrent neural networks // *IEEE transactions on neural networks*. 2001. Vol. 12, N. 6. P.1411–1432. doi: 10.1109/72.963777
21. Van den Oord A., Dieleman S., Schrauwen B. Deep content-based music recommendation. In: *Advances in neural information processing systems*, 2013.
22. Collobert R., Weston J. A unified architecture for natural language processing: Deep neural networks with multitask learning. In: *25th international conference on Machine learning*. 2008. P. 160–167. doi: 10.1145/1390156.1390177
23. Avilov O., Rimbert S., Popov A., Bougrain L. Deep learning techniques to improve intraoperative awareness detection from electroencephalographic signals. In: *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*. 2020. P. 142–145. doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176228
24. Tsantekidis A., Passalis N., Tefas A., et al. Forecasting stock prices from the limit order book using convolutional neural networks. In: *19th conference on business informatics (CBI)*. 2017. Vol. 1. P. 7–12. doi: 10.1109/CBI.2017.23
25. Wang Y., Li Z., Wang L., Wang M. A Scale Invariant Feature Transform Based Method // *J. Inf. Hiding Multim. Signal Process*. 2013. Vol. 4, N. 2. P. 73–89.
26. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: *IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05)*. IEEE, 2005. Vol. 1. P. 886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177
27. Салып Б.Ю. Декодирующие методы открытой генерации текста в больших языковых моделях // *Вестник науки и образования*. 2023. № 10–2(141). С. 8–14.
28. Kasneci E., Sebler K., Küchemann S., et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education // *Learning and individual differences*. 2023. Vol. 103. doi: 10.1016/j.lindif.2023.102274
29. Igel'nik B., Pao Y.-H. Stochastic choice of basis functions in adaptive function approximation and the functional-link net // *IEEE Trans. Neural Network*. 1995. Vol. 6. P. 1320–1329. doi: 10.1109/72.471375

30. Pao Y.H., Park G.H., Sobajic D.J. Learning and generalization characteristics of the random vector functional-link net // *Neurocomputing*. 1994. Vol. 6. P. 163–180. doi: 10.1016/0925-2312(94)90053-1
31. 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
32. Powell M.J. Radial Basis Functions for Multivariable Interpolation: A Review. In: Mason J.C., Cox M.G. Eds. *Algorithms for Approximation*. Oxford: Clarendon Press, 1987. P. 143–167.
33. Lowe D., Broomhead D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // *Complex systems*. 1988. Vol. 2, N. 3. P. 321–355.
34. Aouiti C., Alimi A.M, Maalej A.A. Genetic-designed beta basis function neural network for multi-variable functions approximation // *Systems Analysis Modelling Simulation*. 2002. Vol. 42, N. 7. P. 975–1009.
35. Montazer G.A., Giveki D., Karami M., Rastegar H. Radial basis function neural networks: A review // *Comput. Rev. J*. 2018. Vol. 1, N. 1. P. 52–74.

REFERENCES

1. Lisov A.A. 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, Kulganatov AZ, Panishev SA. Using convolutional neural networks for acoustic based emergency vehicle detection. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):95–107 (in Russ.). doi: 10.17816/transsyst20239195-107
3. Cirrincione M, Pucci M, Cirrincione G, Capolino GA. Sensorless control of induction machines by a new neural algorithm: The TLS EXIN neuron. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007;54(1):127–149. doi: 10.1109/TIE.2006.888774
4. Su D, Zhang H, Chen H, Yi J, Chen PY, Gao Y. Is robustness the cost of accuracy? A comprehensive study on the robustness of 18 deep image classification models. *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*. 2018; 631–648.
5. Gama J, Žliobaitė I, Bifet A, et al. A survey on concept drift adaptation. *ACM computing surveys (CSUR)*. 2014;46(4):1–37. doi: 10.1145/252381
6. Berkenkamp F, Turchetta M, Schoellig A, Krause A. Safe model-based reinforcement learning with stability guarantees. *Advances in neural information processing systems*. 2017;30.
7. Jarrahi MH. Artificial intelligence and the future of work: Human-AI symbiosis in organizational decision making. *Business horizons*. 2018;61(4):577–586.
8. Khan J, Wei JS, Ringner M, et al. Classification and diagnostic prediction of cancers using gene expression profiling and artificial neural networks. *Nature medicine*. 2001;7(6):673–679. doi: 10.1038/89044
9. Nguyen A, Yosinski J, Clune J. Deep neural networks are easily fooled: High confidence predictions for unrecognizable images. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2015;427–436. doi: 10.1016/j.bushor.2018.03.007

10. Rosenblatt F. *Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms*. New York: Cornell Aeronautical Lab Inc Buffalo; 1961.
11. Minsky M, Papert S. *Perceptrons. An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge: MIT Press; 1969.
12. Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning internal representations by error propagation. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*. 1986;1:318–362.
13. Szegedy C, Toshev A, Erhan D. Deep neural networks for object detection. In: *Advances in neural information processing systems*. 2013;26.
14. Rolnick D, Tegmark M. The power of deeper networks for expressing natural functions. In: *arXiv preprint*. 2017. doi: 10.48550/arXiv.1705.05502
15. Serrano-Pérez JD, Fernández-Anaya G, Carrillo-Moreno S, Yu W. New results for prediction of chaotic systems using deep recurrent neural networks. *Neural Processing Letters*. 2021;53:1579–1596. doi: 10.1007/s11063-021-10466-1
16. Bucci MA, Semeraro O, Allauzen A, et al. Control of chaotic systems by deep reinforcement learning. *Proceedings of the Royal Society A*. 2019;475(2231). doi: 10.1098/rspa.2019.0351
17. Chai X, Gan Z, Yuan K, et al. A novel image encryption scheme based on DNA sequence operations and chaotic systems. *Neural Computing and Applications*. 2019;31(1):219–237. doi: 10.1007/s00521-017-2993-9
18. Kombrink S, Mikolov T, Karafiát M, Burget L. Recurrent Neural Network Based Language Modeling in Meeting Recognition. *Interspeech*. 2011;11:2877–2880.
19. Hagan MT, De Jesús O, Schultz R, et al. Training recurrent networks for filtering and control. *Recurrent neural networks: Design and applications*. 1999:311–340.
20. Parlos AG, Menon SK, Atiya A. An algorithmic approach to adaptive state filtering using recurrent neural networks. *IEEE transactions on neural networks*. 2001;12(6):1411–1432. doi: 10.1109/72.963777
21. Van den Oord A, Dieleman S, Schrauwen B. Deep content-based music recommendation. In: *Advances in neural information processing systems*; 2013.
22. Collobert R, Weston J. A unified architecture for natural language processing: Deep neural networks with multitasks learning. In: *25th international conference on Machine learning*. 2008:160–167. doi: 10.1145/1390156.1390177
23. Avilov O, Rimbert S, Popov A, Bougrain L. Deep learning techniques to improve intraoperative awareness detection from electroencephalographic signals. In: *42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*. 2020:142–145. doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176228
24. Tsantekidis A, Passalis N, Tefas A, et al. Forecasting stock prices from the limit order book using convolutional neural networks. In: *19th conference on business informatics (CBI)*. 2017;1:7–12. doi: 10.1109/CBI.2017.23
25. Wang Y, Li Z, Wang L, Wang M. A Scale Invariant Feature Transform Based Method. *J. Inf. Hiding Multim. Signal Process*. 2013;4(2):73–89.
26. Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: *IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR '05)*. IEEE; 2005;1:886–893. doi: 10.1109/CVPR.2005.177

27. Salyp BYu. Decoding methods for open text generation in large language models. *Bulletin of Science and Education*. 2023;10(141):8–14. (in Russ.).
28. Kasneci E, Sebler K, Küchemann S, et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and individual differences*. 2023;103. doi: 10.1016/j.lindif.2023.102274
29. Igel'nik B, Pao Y-H. Stochastic choice of basis functions in adaptive function approximation and the functional-link net. *IEEE Trans. Neural Network*. 1995;6:1320–1329. doi: 10.1109/72.471375
30. Pao YH, Park GH, Sobajic DJ. Learning and generalization characteristics of the random vector functional-link net. *Neurocomputing*. 1994;6:163–180. doi: 10.1016/0925-2312(94)90053-1
31. 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
32. Powell MJ. Radial Basis Functions for Multivariable Interpolation: A Review. In: *Mason J.C., Cox M.G. Eds. Algorithms for Approximation*. Oxford: Clarendon Press; 1987. P. 143–167.
33. Lowe D, Broomhead D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks. *Complex systems*. 1988;2(3):321–355.
34. Aouiti C, Alimi AM, Maalej AA. Genetic-designed beta basis function neural network for multi-variable functions approximation. *Systems Analysis Modelling Simulation*. 2002;42(7):975–1009.
35. Montazer GA, Giveki D, Karami M, Rastegar H. Radial basis function neural networks: A review. *Comput. Rev. J*. 2018;1(1):52–74.

Сведения об авторе:

Лисов Андрей Анатольевич, аспирант;

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

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

Возмилов Александр Григорьевич, профессор, доктор технических наук;

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

E-mail: vozmiag@rambler.ru

Гундарев Кирилл Александрович, аспирант

eLibrary SPIN: 1238-1158; ORCID: 0009-0004-8358-1329;

E-mail: pioneer03.95@mail.ru

Information about the author:

Andrey A. Lisov, postgraduate student;

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

E-mail: lisov.andrey2013@yandex.ru

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

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

E-mail: vozmiag@rambler.ru

Kirill A. Gundarev, postgraduate student

eLibrary SPIN: 1238-1158; ORCID: 0009-0004-8358-1329;

E-mail: pioneer03.95@mail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst636732>

© К.К. Ким, Е.Б. Королева, П.К. Рыбин, О.А. Степанская
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. Показать возможность использования бесконтактного способа подзаряда аккумуляторной батареи, установленной на беспилотном летательном аппарате, в процессе мониторинга контактной сети переменного тока электрифицированного железнодорожного транспорта.

Материалы и методы. Создана математическая модель в программе COMSOL Multiphysics® 6.0 с использованием уравнений Максвелла и метода конечных элементов для расчета наведенной электродвижущей силы в бортовой обмотке летательного аппарата.

Результаты. Определены оптимальные режимы эксплуатации разработанного летательного аппарата. Показана экономическая целесообразность его использования для мониторинга контактной сети железнодорожного транспорта.

Практическая значимость. Разработан беспилотный летательный аппарат, характеризующийся увеличенной продолжительностью беспосадочного полета, а, следовательно, увеличенным временем непрерывного мониторинга.

Ключевые слова: время полета; электромагнитное поле; тяговый ток; контактный провод; заряд; беспилотный летательный аппарат; траектория.

Как цитировать:

Ким К.К., Королева Е.Б., Рыбин П.К., Степанская О.А. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 463–476. doi: 10.17816/transsyst636732

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, научный проект № 24-29-00159

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject –Electrotechnical complexes and systems

© **K.K. Kim, E.B. Koroleva, P.K. Rybin, O.A. Stepanskaya**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR MONITORING THE AC CONTACT NETWORK

Aim. To demonstrate the feasibility of using a contactless battery recharging method for an unmanned aerial vehicle during the monitoring of the AC contact network in railway transport.

Materials and methods. A mathematical model was created using the COMSOL Multiphysics 6.0 program. Maxwell's equations and the finite element method were applied to calculate the induced electromotive force across the on-board winding of an aircraft.

Results. We determined the optimal operating modes of the developed aircraft. The economic feasibility of its use for monitoring the contact network of railway transport is shown.

Practical significance. We developed an unmanned aerial vehicle with extended nonstop flight duration and an increased capacity for continuous monitoring.

Keywords: flight time; electromagnetic field; traction current; contact wire; charge; unmanned aerial vehicle; trajectory.

To cite this article:

Kim KK, Koroleva EB, Rybin PK, Stepanskaya OA. An unmanned aerial vehicle for monitoring an AC contact network. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):463–476. doi: 10.17816/transsyst636732

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная и надежная эксплуатация электрифицированных железных дорог России, а их протяженность составляет 42,9 тыс. км (из них 25 тыс. км приходится на переменный ток), напрямую связана с постоянным мониторингом состояния контактной сети. С недавних пор для этого используют электрические беспилотные летательные аппараты (БЛА), в большинстве своем, мультикоптерного вида [1–3].

Однако, кроме достоинств, БЛА свойственны некоторые недостатки, например, недостаточное полетное время, что обусловлено относительно малой емкостью бортовой аккумуляторной батареи (БАБ), а, следовательно, приводит к необходимости прерывания операции мониторинга объекта.

Данную проблему можно решить разными способами, одним из которых является увеличение емкости БАБ, но данный способ не всегда приемлем, поскольку увеличение емкости приведет к увеличению ее массы, и, следовательно, самого летательного аппарата.

Другим решением является применение на БЛА воздушных винтов с изменяемым углом атаки лопастей, но данный способ требует специального оборудования для контроля ориентации лопастей, а также специальных конструкций винтов, что усложняет конструкцию летательного аппарата, понижает надежность и ухудшает массогабаритные показатели.

Расположение фотоэлектрических преобразователей на БЛА для подзаряда БАБ не в полной мере решает обозначенную проблему, т.к. этот способ может быть использован только в дневное время суток [4].

В настоящей работе описывается мультироторный БЛА, в котором подзаряд БАБ осуществляется во время полета аппарата вблизи запитанного переменным током контактного провода. Для подзаряда БАБ используется энергия внешнего магнитного поля, созданного тяговым током.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАТУШКОЙ

Новизна конструкции заключается в следующем – на борту БЛА установлена электрическая катушка с обмоткой (в частном случае кольцевой формы) для бесконтактного заряда БАБ во время полета БЛА за счет энергии магнитного поля, созданного токами, протекающими по контактной сети переменного тока [5, 6]. Следует отметить, что источником данного поля могут быть токи в проводах воздушной линии электропередачи.

В центре БЛА расположен несущий каркас 1 (Рис. 1), к которому прикреплены одними своими концами радиальные штанги 2. На других концах штанг 2 с помощью креплений 3 установлены электродвигатели 4 (например, AXI 2814/22, 037 или Racerstar Racing Edition 2306 2700 KV) с воздушными винтами 5. На шасси 6 установлена БАБ 7 (например, LiPo 4S 1500 mAh или 3500 mAh). Электродвигатели 4 через регулятор оборотов 9 запитываются от БАБ. На центральной части каркаса 1 (снизу) установлен гиростабилизированный подвес 11 с видеокамерой 8.

На корпусах электродвигателей 4 своей внутренней поверхностью закреплено габаритное кольцо с кольцевой катушкой 12. Возможен вариант, когда эта катушка располагается ниже воздушных винтов, тогда подзаряд осуществляется за счет токов, протекающих по несущему тросу контактной подвески.

На борту БЛА расположены система обеспечения полета, система спутниковой навигации и система связи с наземной базой.

БЛА может эксплуатироваться как в «автономном» режиме, так и в «ручном».

В случае «автономного» режима полет БЛА происходит по программе, заложенной в бортовой компьютер, куда поступают также сигналы с блока спутниковой навигации.

Если полет БЛА выполняется в «ручном» режиме управление реализуется по командам с наземной базы и по сигналам блока спутниковой навигации.

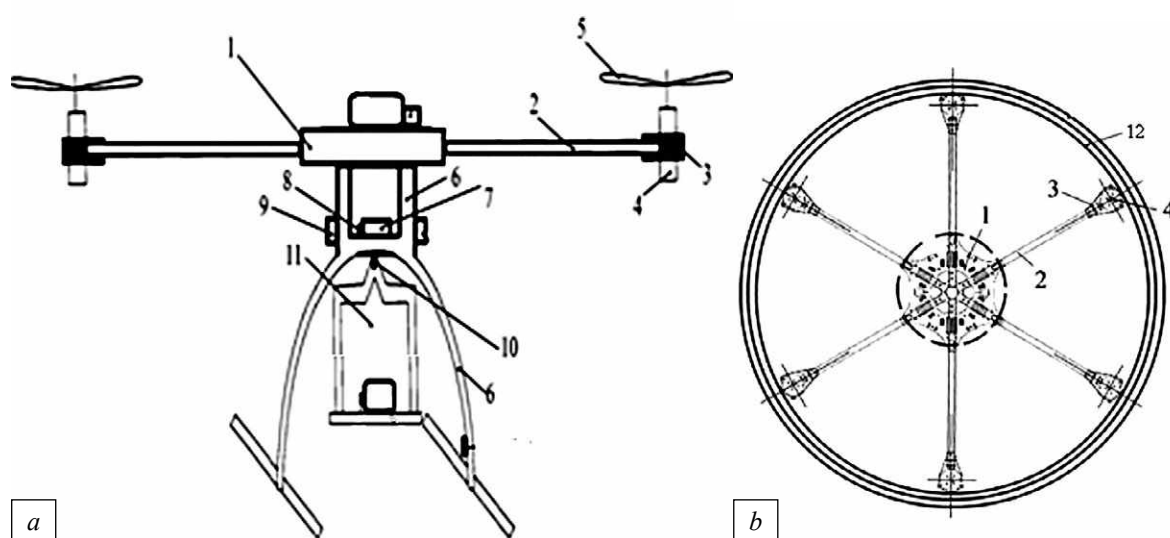


Рис. 1. БЛА: а) вид сбоку; б) вид сверху

Fig. 1. The UAV: a) side view; b) top view

И в первом, и во втором случае имеет место визуальный контроль за полетом БЛА с последующей передачей данных о полете на наземную базу управления.

При разряде БАБ БЛА сближается с запитанным контактным проводом. Сближение происходит до момента срабатывания датчика напряженности электромагнитного поля при 1 кВ/см, что составляет пробивную напряженность влажного воздуха и «зависает» или продолжает полет на фиксированном расстоянии от контактного провода.

Принцип подзаряда БАБ заключается в следующем: во время мониторинга объекта (контактной сети, путевого полотна и т.п.) БЛА выполняет полет по определенной траектории или «зависает» в непосредственной близости от контактного провода. Под действием переменного магнитного поля тягового тока в обмотке кольцевой катушки индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), под действием которой в цепи, состоящей из обмотки кольцевой катушки, зарядного устройства и аккумуляторной батареи, начинает протекать электрический ток. Когда аккумуляторная батарея полностью зарядится, БАБ отключается от обмотки кольцевой катушки с помощью устройства управления зарядом.

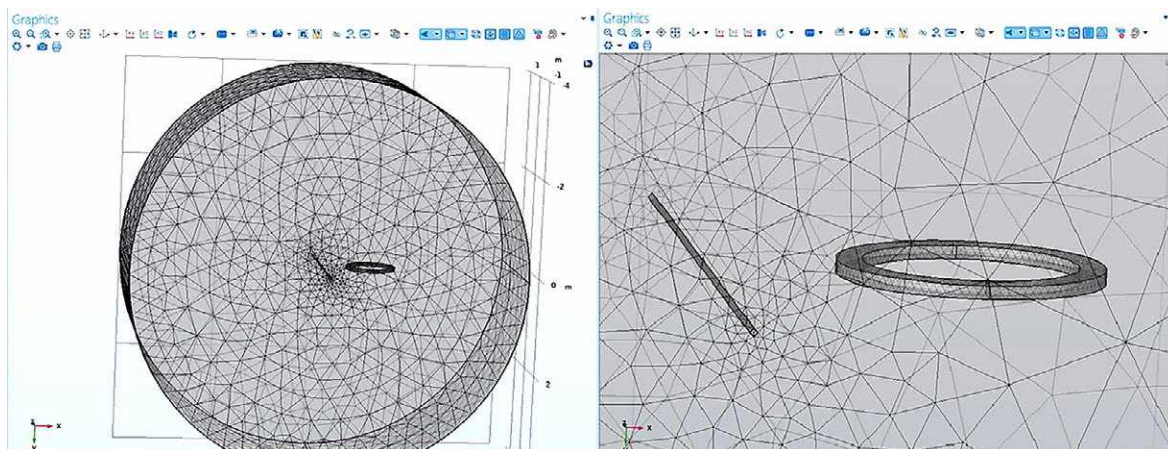
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЗАРЯДА БАБ

С целью подтверждения возможности использования предложенного способа были проведены исследования данного процесса на примере подзаряда БАБ Phantom 4/4 Pro Intelligent Flight Battery 5870 mAh от контактной сети железнодорожного транспорта напряжением 27,5 кВ (50 Гц). Батарея обладает повышенной емкостью в 5870 мА·ч и рабочим напряжением 15,2 В. Ей оборудуются квадрокоптеры типа Phantom 4 Pro+V2.0 [7].

Для этого была создана математическая модель в программе COMSOL Multiphysics® 6.0 с использованием метода конечных элементов.

В качестве программы для математического моделирования была выбрана программа для решения мультифизических задач – COMSOL Multiphysics® 6.0. Выбор именно этой программы обусловлен возможностью моделирования динамических режимов и расчетов в 3D.

На модели (Рис. 2) показаны сетка конечных элементов, контактный провод и обмотка кольцевой катушки. Расчет производился в воздушном пространстве, окружающем конструктивные элементы модели [8].

**Рис. 2.** Геометрия математической модели**Fig. 2.** Geometry of the mathematical model

В качестве начальных данных выступали: предварительно рассчитанное число витков обмотки кольцевой катушки и амплитудное значение тока в контактном проводе.

Постановка задачи формулировалась с помощью системы уравнений электромагнитного поля.

Считалось, что кольцевая катушка осуществляет движение на определенном постоянном расстоянии от контактного провода. Также делалось предположение, что магнитного поля за пределами расчетной области нет (использовалось условие магнитной изоляции на границе расчетной области). Расположение обмотки кольцевой катушки задавалось с помощью области Coil, а контактный провод – с помощью настройки типа катушки (coiltype) в виде линейного провода (linear). Сама катушка описывалась с помощью типа катушки (circular).

Для получения зарядного напряжения необходимой величины, число витков обмотки кольцевой катушки (3880 витков) находилось с учетом этого требования. При этом считалось, что обмотка совершает движение с постоянной продольной скоростью (v) на одном и том же удалении (h) от контактного провода.

Были приняты ниже перечисленные допущения:

- 1) плотность тягового тока постоянна по всему сечению контактного провода;
- 2) провод контактной сети имеет форму тонкого прямого цилиндра (схема «зиг-заг» не учитывается);
- 3) витки по поперечному сечению обмотки кольцевой катушки намотаны равномерно;

- 4) намагничивающая сила тягового тока не оказывает заметного влияния на результирующее магнитное поле;
- 5) влияние вихревых токов в электропроводящих крепежных элементах на величину наведенной в обмотке электродвижущей силы (ЭДС) – незначительно;
- 6) переходные процессы в контактной сети отсутствуют;
- 7) воздушные потоки и сила аэродинамического сопротивления не влияют на полет БЛА.

На первом этапе исследований рассматривался случай «зависания» БЛА относительно контактного провода, по которому протекал синусоидальный ток. Действующее значение тока определялось по рекомендациям, приведенным в [9], как среднестатистическое значение. Для магистрального участка контактной сети оно составило 300 А.

Расстояние от кольцевой катушки диаметром 0,8 м до контактного провода составляло 1 м.

Для расчета ЭДС, наведенной в обмотке кольцевой катушки, рассчитывалось потокоцепление магнитного потока поля тягового тока с данной обмоткой с помощью встроенной процедуры Comsol (был использован интерфейс Parametric Sweep). В результате было получено напряжение на ее выводах, равное 49,1 В.

На втором этапе рассматривался случай полета БЛА по прямолинейной траектории вдоль контактного провода с постоянной скоростью 2 м/с. Допущения 4) и 6), а также линейная постановка задачи позволили расчет ЭДС в движущейся обмотке выполнить для квазистационарного случая.

В начале для текущего значения времени с помощью метода конечных элементов рассчитывалось потокоцепление (Ψ) по специально созданной математической модели (Рис. 3). В данной модели были применены сочетания подвижных и деформируемых сеток. На рис. 3 области, которые подвергаются деформации в направлении оси x обозначены позициями 1 и 2, а недеформируемая область вокруг обмотки помечена – позицией 3. Области, которым свойственна деформация по оси y , пронумерованы как 4 и 5. Область вокруг контактного провода (она неподвижна и недеформирована) обозначена позицией 6.

С использованием алгоритмов численного дифференцирования рассчитывалась ЭДС по формуле:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

При полете БЛА наведенная в обмотке кольцевой катушки ЭДС содержит две компоненты: первая обусловлена переменным характером магнитного поля тока в контактном проводе, вторая возникает при движении БЛА с кольцевой катушкой относительно контактного провода.

Расчеты показали, что доля ЭДС, обусловленная движением БЛА, не превышает сотых долей вольт.

Для усиления влияния движения БЛА на величину индуцированной ЭДС было предложено выполнять полет по траектории, отличной от прямолинейной, на постоянной высоте полета. Рассматривалось два вида траекторий полета: вариант 1, траектория «синусоида», причем плоскость, в которой лежит траектория, находится снизу от контактного провода на постоянном расстоянии от него (Рис. 4а), а ось симметрии синусоиды совпадает с проекцией контактного провода на плоскость траектории; вариант 2, траектория «синусоида», сбоку от контактного провода на некотором расстоянии от него, причем траектория полета и контактный провод лежат в одной горизонтальной плоскости (Рис. 4б).

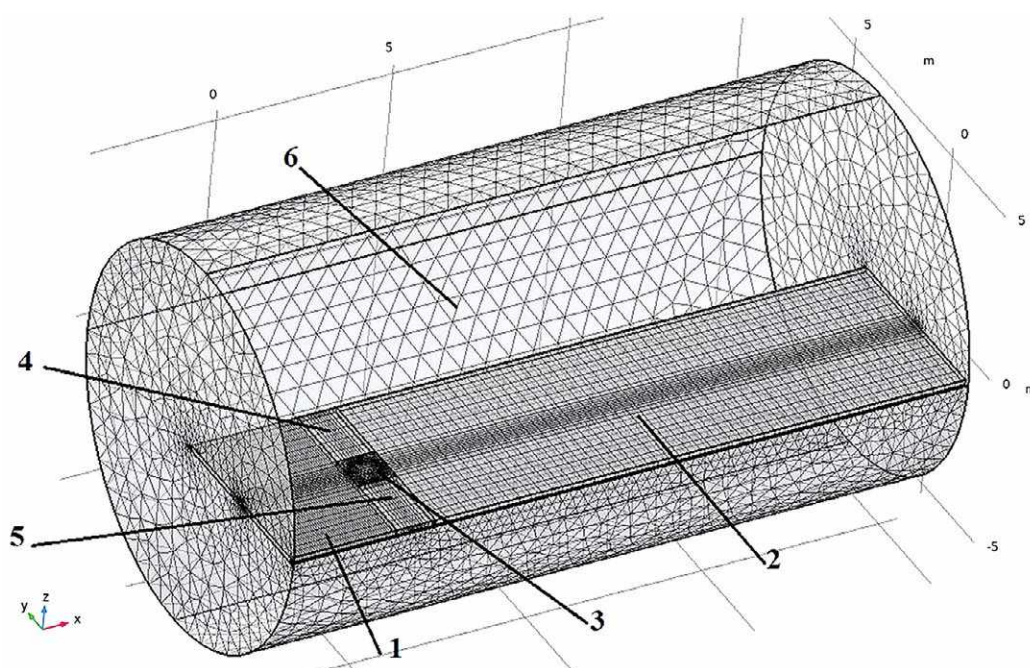


Рис. 3. Математическая модель для расчета ЭДС при полете БЛА вдоль контактного провода

Fig. 3. The mathematical model for calculating the EMF when an UAV flies along the contact wire

Полетная траектория типа «синусоида» представлялась в виде сочетания прямолинейного движения вдоль контактного провода (ось x) с постоянной скоростью и колебаний относительно поперечной оси (ось y):

$$dx = v \cdot t,$$

где v – скорость движения, м/с; t – время, с;

$$dy = A \cdot \sin(2\pi \frac{t}{T}),$$

где A – амплитуда поперечных перемещений обмотки БЛА; T – период этих колебаний, с (Рис. 4).

Для варианта 1 плоскость, в которой лежит траектория полета БЛА находилась ниже горизонтальной плоскости контактного провода на 0,5 м. исследовались случаи, когда обмотка совершала поперечные синусоидальные колебания с амплитудами, равными 0,25 м; 0,5 м; 0,75 м и 1 м [10].

В варианте 2 ось симметрии синусоидальной траектории на 1,6 метров отстояла от продольной оси контактного провода. Поперечные синусоидальные колебания обмотки имели амплитуду, равную 0,25 и 0,5 м, и период – 0,25 и 0,5 с.

Скоростям полета вдоль провода придавались значения: 2 м/с и 10 м/с.

Некоторые результаты расчета приведены на Рис. 5.

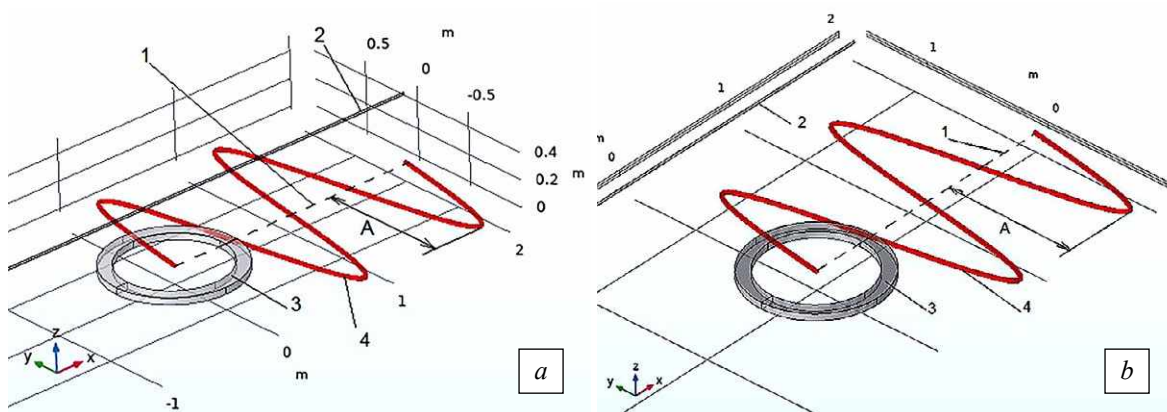


Рис. 4. Полетная траектория БЛА: а) под проводом, б) сбоку от провода:

1 – ось направления прямолинейного движения; 2 – контактный провод;

3 – обмотка кольцевой катушки; 4 – траектория полета

Fig. 4. The flight path of the UAV: a) under the wire, b) to the side of the wire:

1 is the axis of the direction of rectilinear motion; 2 is the contact wire; 3 is the winding of the annular coil; 4 is the flight path

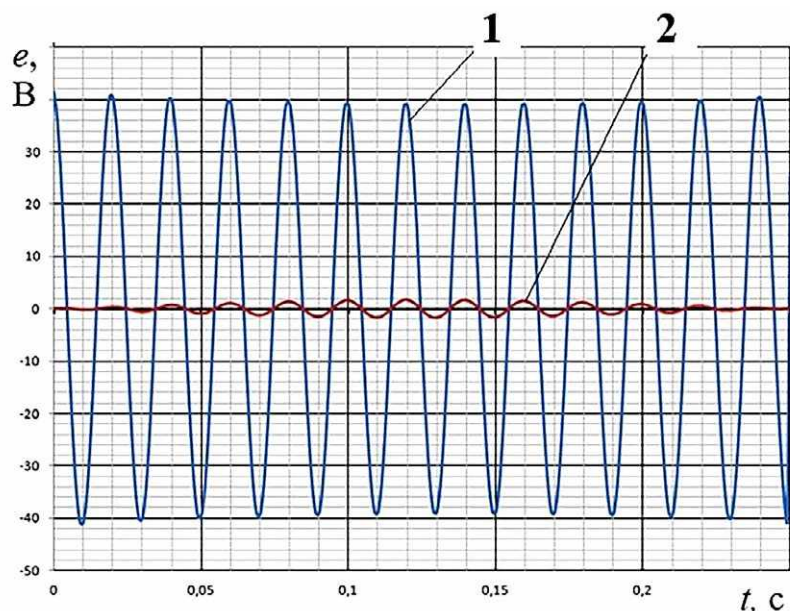


Рис. 5. Зависимость ЭДС в обмотке при движении вдоль контактного провода с переменным током частотой 50 Гц и действующим значением 300 А: кривая 1 – вариант 2; кривая 2 – вариант 1

Fig. 5. The dependence of the EMF across the winding when moving along the contact wire with an alternating current of 50 Hz and the effective value of 300 A: curve 1 – variant 2; curve 2 – variant 1

При полете БЛА по траектории варианта 2 значения наводимой ЭДС в обмотке кольцевой катушки достаточны для подзаряда БАБ [11–16].

Результаты расчетов показали сильную зависимость величины наведенной ЭДС обмотки от параметров переменного магнитного поля, созданного тяговым током, и незначительную – от скорости полета аппарата [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОоды

1. Наибольшие значения ЭДС, наводимой в обмотке кольцевой катушки, наблюдаются при полете БЛА сбоку от контактного провода с переменным тяговым током по траектории «синусоида».
2. Амплитуда наводимой ЭДС в первую очередь зависит от амплитуды и частоты магнитного поля, созданного тяговым током, а параметры полета БЛА не оказывают существенного влияния на величину ЭДС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования, описанные в статье, выполнялась в рамках научного проекта № 24-29-00159 гранта, предоставленного Российским Научным

Фондом на 2024–2025 гг. по результатам конкурса 2023 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

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. Дроны на железных дорогах. Ожидание или реальность? [internet] Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://www.djimsk.ru/guides/2022/02/16/drony-na-zheleznih-dorogah-ozhidanie-vs-realnost>
2. Применение беспилотных летательных аппаратов в железнодорожном комплексе. [internet] Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/227>
3. Классификация БЛА по летным характеристикам. [internet] Дата обращения: 29.11.2022. Режим доступа: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>
4. Зеленцов В.В., Тарасов В.С., Шаповалов Л.А. Оценка изменения продолжительности полета беспилотного летательного аппарата с электродвигателем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2013. № 3(92). С. 77–85. EDN: RBGXGB
5. Евразийский патент РФ 2006007 / 31.03.2023 Ким К.К. Беспилотный летательный комплекс.
6. Валинский О.С., Ким К.К. Разработки Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 2. С. 8–14.
7. Phantom 4 Pro Plus V2.0. Authorized retail store. Каталог продукции. [internet] Дата обращения: 29.07.2024. Режим доступа: <https://aeromotus.ru/product/dji-phantom-4-pro-plus-v2-0>
8. Ватаев А.С., Михайлов М.В., Соловьев А.С. Математическое моделирование бесконтактного заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата. В кн.: Транспорт России: проблемы и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2022 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Коллектив авторов. Том 2. Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. С. 103–106. EDN: MEEULT

9. Некрасов О.А., Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А., Рахманинов В.И. Режимы работы магистральных электровозов. М.: Транспорт, 1983.
10. Михайлов М.В., Соловьев А.С., Рогов А.С., и др. Бесконтактный способ заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата. В кн.: Современная наука, общество, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 сентября 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 30–33. EDN: XXMEUI
11. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. Дата обращения: 29.07.2024. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59070/>
12. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
13. Bins K.J., Lawrenson P. Analysis and computation of electric and magnetic problems. Oxford: Pergamon Press, 1963. Дата обращения: 04.08.2024. Режим доступа: <https://archive.org/details/analysiscomputat0000binn>
14. Flankl M., Wellerdieck T., Tüysüz A., Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation // IET Electric Power Applications. 2017. Т. 12, № 3. С. 357–364. doi: 10.1049/iet-epa.2017.0480
15. Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Florida, Kissimmee. doi: 10.2514/6.2015-1587
16. Ким К.К., Королева Е.Б., Ватаев А.С. Мониторинг объектов инфраструктуры железных дорог с применением беспилотных летательных аппаратов. В кн.: Eltrans – 2023: сборник трудов XI Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 31 мая – 02 июня 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. С. 247–252. EDN: ARWRUW

REFERENCES

1. Drony na zheleznih dorogah. Ozhidanie ili realnost? [internet] Accessed: 29.11.2023. Available from: <https://www.djimsk.ru/guides/2022/02/16/drony-na-zheleznih-dorogah-ozhidanie-vs-realnost> (In Russ.)
2. Primenenie bespilotnykh letatelnykh apparatov v zheleznodorozhnom komplekse [internet] Accessed: 29.11.2023. Available from: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/227> (In Russ.)
3. Klassifikatsiya BLA po letnym harakteristikam. [internet] Accessed: 29.11.2022. Available from: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html> (In Russ.)
4. Zelentsov VV, Tarasov VS, Shapovalov LA. Assessment of changes in the flight duration of an unmanned aerial vehicle with an electric motor. *Bulletin of*

- the Bauman Moscow State Technical University*. 2013;3(92):77–85. (In Russ.) EDN: RBGXGB
5. Eurasian Patent RUS 2006007 / 31.03.2023 Kim KK. Unmanned aerial system. (In Russ.)
 6. Valinsky OS, Kim KK. Developments of the St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I in the field of unconventional and renewable energy. *Transport of the Russian Federation*. 2024;2:8–14. (In Russ.)
 7. Phantom 4 Pro Plus V2.0. Authorized retail store. Product catalog. [internet] Accessed: 29.07.2024. Available from: <https://aeromotus.ru/product/dji-phantom-4-pro-plus-v2-0> (In Russ.)
 8. Vataev AS, Mikhailov MV, Solovyov AS. Mathematical modeling of contactless battery charging of an unmanned aerial vehicle. In: *Transport of Russia: problems and prospects: Materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09-10, 2022 / N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Team of authors. Volume 2*. St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; 2022. 103–106. (In Russ.) EDN: MEEULT
 9. Nekrasov OA, Lisitsyn AL, Muginstein LA, Rachmaninov VI. *Modes of operation of mainline electric locomotives*. Moscow: Transport; 1983. (In Russ.)
 10. Mikhailov MV, Solovyov AS, Rogov AS, et al. Contactless method of charging the battery of an unmanned aerial vehicle. In: *Modern science, society, education: current issues, achievements and innovations: Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference, Penza, September 15, 2022*. Penza: Science and Education; 2022:30–33. (In Russ.) EDN: XXMEUI.
 11. Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogopodvesa i sverhprovodimosti*. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniy nazheleznodorozhnom transporte”; 2007. Accessed: 29.07.2024. Available from: <https://e.lanbook.com/book/59070> (In Russ.)
 12. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problem tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
 13. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems*. Oxford: PergamonPress; 1963. [internet] Accessed: 04.08.2024. Available from: <https://archive.org/details/analysiscomputat0000binn>
 14. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*. 2017;12(3):357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
 15. Chin JC, Gray JS, Jones SM, Berton JJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida*. doi: 10.2514/6.2015-1587
 16. Kim KK, Koroleva EB, Vataev AS. Monitoring of railway infrastructure facilities using unmanned aerial vehicles. In: *Eltrans – 2023: proceedings of the XI International*

Symposium, St. Petersburg, May 31 – June 02, 2023 / St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I. St. Petersburg: NP-Print; 2023:247–252. EDN: ARWRUW

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru

Королева Елена Борисовна, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 5664-6112; ORCID: 0009-0002-1804-6982;

E-mail: elzazybina@yandex.ru

Рыбин Петр Кириллович, кандидат технических наук, профессор,

eLibrary SPIN: 6592-1064; ORCID: 0000-0001-7396-2954;

E-mail: rybin@pgups.ru

Степанская Ольга Андреевна, кандидат технических наук;

eLibrary SPIN: 5918-7823; ORCID: 0000-0002-2993-2261;

E-mail: step_step@mail.ru

Information about the authors:

Konstantin K. Kim, Doctor of Technical Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru

Elena B. Koroleva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 5664-6112; ORCID: 0009-0002-1804-6982;

E-mail: elzazybina@yandex.ru

Peter K. Rybin, Candidate of Technical Sciences, Professor,

eLibrary SPIN: 6592-1064; ORCID: 0000-0001-7396-2954;

E-mail: rybin@pgups.ru

Olga A. Stepanskaya, Candidate of Technical Sciences;

eLibrary SPIN: 5918-7823; ORCID: 0000-0002-2993-2261;

E-mail: step_step@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst636208>

© В.А. Максимов^{1, 2}

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

² ФАУ «РОСДОРНИИ»
(Москва, Россия)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ «КОМПАКТ-АСФАЛЬТ»

Обоснование. Технология «компакт-асфальт» по сравнению с традиционной технологией позволяет получить покрытие значительно долговечнее обычного, сократить срок выполнения работ до 2-х раз, позволяет укладывать асфальтобетон при низких температурах без потери качества и т.д. В связи с тем, что, при действующих нормативных правовых документах в области строительства, возникают сложности в обосновании применения различных инновационных материалов и технологий при поступлении проектной документации, в орган, осуществляющий экспертизу такой проектной документации, данная тематика является весьма актуальной.

Цель. Провести анализ особенностей асфальтобетонных слоев, устроенных по технологии «компакт-асфальт». Одновременно с этим, выявить основные проблемы внедрения технологии «компакт-асфальт» в дорожную отрасль Российской Федерации.

Методы. Рассмотрены различные нормативные документы в части предъявляемых требований к эксплуатационному состоянию автомобильных дорог, к асфальтобетонным смесям. Проанализированы статьи авторов по соответствующей тематике.

Результаты. На основе анализа результатов научно-технического обзора, а также опыта применения технологии за рубежом, сделан вывод о целесообразности применения данной технологии в Российской Федерации.

Ключевые слова: автомобильные дороги; асфальтобетонные слои; технология «компакт-асфальт».

Как цитировать:

Максимов В.А. Современное состояние вопроса о применении технологии «компакт-асфальт» // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 477–488. doi: 10.17816/transsyst636208

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

© V.A. Maksimov^{1, 2}

¹ Moscow Automobile and Highway State Technical University

² FAI “ROSDORNII”

(Moscow, Russia)

CURRENT STATE OF THE QUESTION ABOUT APPLICATION OF “COMPACT-ASPHALT” TECHNOLOGY

Background. Current regulatory documents in the construction field often make it difficult to justify the use of innovative materials and technologies when submitting project documentation for review to the body makes the topic highly relevant.

Aim. Conduct an analysis of the principles and features of the asphalt concrete layers constructed using the Compact Asphalt technology. At the same time, to identify the main problems of introducing the Compact Asphalt technology into the road industry of the Russian Federation.

Methods. Various regulatory documents are considered regarding the requirements for the operational condition of highways and asphalt concrete mixtures. The authors' articles on relevant topics were analyzed.

Results. Based on an analysis of the results of scientific and technical selection, as well as experience in applying the technology abroad, a conclusion was made about the feasibility of using this technology in the Russian Federation.

Keywords: highways; asphalt concrete layers; compact asphalt technology.

To cite this article:

Maksimov VA. Current state of the issue on the use of compact asphalt technology.

Modern Transportation Systems and Technologies. 2024;10(4):477–488.

doi: 10.17816/transsyst636208

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации реализуются многочисленные дорожно-строительные проекты, в том числе, широко известный национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги», который включает в себя федеральный проект «Дорожная сеть». Главной целью данного федерального проекта является доведение доли дорожной сети, находящейся в нормативном транспортно-эксплуатационном состоянии, до уровня не ниже 85%.

Большинство национальных проектов имеют временные ограничения. В связи с чем возникает потребность в продлении строительного сезона и ускорении темпов производства работ. Эффективное выполнение поставленных перед дорожной отраслью задач, неотъемлемо связано с высокой долей участия инновационных решений в таких проектах.

Одновременно с этим с учетом роста грузоперевозок и повышения автомобилизации населения, наблюдается ускоренный износ покрытия проезжей части автомобильных дорог. В первую очередь это приводит к появлению колеи истирания по полосам движения, а также к появлению «гребенок» в зонах торможения и разгона транспортных средств. При ухудшении ровности покрытия происходит зарождение новых разрушений, а также ускоренное развитие уже существующих дефектов, в связи с увеличением динамического воздействия нагрузки на покрытие дорожной одежды. Кроме того, вследствие возникновения колебаний от транспортного средства, проезжающего по неровному покрытию дорожной одежды, изменяется не только динамичность приложения нагрузки, но и время воздействия, а также удельное давление колеса на покрытие автомобильной дороги.

В связи с вышеизложенным, дорожно-строительной отрасли на постоянной основе приходится совершенствовать материалы и технологии, применяемые при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании автомобильных дорог. Вместе с тем в условиях ограниченного финансирования возникает необходимость в уменьшении материалоемкости конструкции дорожной одежды без потери ее прочностных характеристик.

Следует отметить, что несмотря на заявленную производителем оборудования возможность уменьшения толщины асфальтобетонных слоев и продление строительного сезона, технология «компакт-асфальт» не получила широкого применения на территории Российской Федерации.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ УСТРОЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ «КОМПАКТ-АСФАЛЬТ»

С целью обеспечения безопасности всех участников дорожного движения, а также поддержания нормативного транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги в соответствии с требованиями ГОСТ 33220-2015 [1] верхние слои дорожной одежды должны «обновляться» каждые несколько лет по мере достижения величины износа в районе 25-40 мм.

Последнее позволяет сделать вывод об экономически неоправданном устройстве дорогостоящих верхних слоев асфальтобетонных покрытий толщиной более 4 см [2].

Одновременно с указанной проблемой, одной из причин возникновения дефектов дорожной одежды автомобильной дороги является слабое сцепление смежных слоев дорожной одежды. Монолитные слои, применяемые в конструкции дорожной одежды, с точки зрения восприятия динамической нагрузки от движения транспортных средств имеют особое значение. А при условии, что устойчивость покрытия проезжей части из асфальтобетонных к возникновению деформаций в значительной степени зависит от многих факторов, в частности от качества уплотнения, гранулометрической и температурной однородности, особо важно повышать качество работ при их устройстве.

Вместе с тем в условиях недостаточного финансирования, а также в связи с быстрым ростом цен на дорожно-строительные материалы, становится все более актуальным вопрос экономии разных видов строительных ресурсов. Кроме того, по экономическим соображениям, исходя из климатических особенностей, на территории Российской Федерации возникает необходимость продления строительного сезона. Так как значительная часть нашей страны находится в неблагоприятных погодных условиях для дорожного строительства, необходимо применение технологий или материалов, позволяющих продлевать строительный сезон.

К примеру, в Германии технология «компакт-асфальт» признана на государственном уровне, как стандартный метод укладки дорожных покрытий, и включена в официальный сборник технических условий ZTV Asphalt-StB 2007.

Технология устройства комбинированного покрытия проезжей части посредством одновременной укладки двух слоев асфальтобетонной смеси различного типа за один проход асфальтоукладчика «компакт-асфальт»

была запатентована в 1993 г. профессором Технического института г. Эрфут в Германии Эльком Рихтером. Впоследствии права на технологию были переданы дочерней компании шведского машиностроительного концерна Atlas Copco – производителю дорожно-строительной техники Дунарас [3].

Исходя из этого, предприятия, которые приобрели необходимую технику компании Дунарас, получили и право на применение технологии «компакт–асфальт» при строительстве автомобильных дорог. По заявлениям производителя, к преимуществам данной технологии укладки асфальтобетонных слоев методом «компакт–асфальт», применительно к условиям Российской Федерации, относятся:

- организационный фактор (возможность продления строительного сезона);
- фактор качества работ (достижение стабильного требуемого уплотнения);
- фактор эксплуатационной надежности (повышенное сцепление между устраиваемыми слоями);
- фактор экономической выгоды (снижение затрат на материалы, за счет уменьшения толщины дорожного покрытия).

Наибольшую известность технология «компакт–асфальт» приобрела в таких западных странах, как Дания, Швеция и Германия, в последней она получила признание на государственном уровне в качестве стандартного метода устройства конструкции дорожного покрытия и включена в официальный сборник технических указаний [4].

Несмотря на то, что данная технология в странах запада известна с 1993 г., на территории Российской Федерации её применение при строительстве и ремонте автомобильных дорог встречается крайне редко. Ключевой особенностью проведения работ методом «компакт–асфальт» с устройством монолитных слоев конструкции дорожной одежды является «втапливание» одного слоя из асфальтобетонной смеси в другой.

На базе лаборатории ФАУ «Росдорнии» в 2015 г. к.т.н Л.А. Горельшевой и инженером И.С. Сахаровым проведены лабораторные исследования асфальтобетонного комбинированного дорожного покрытия по принципу «горячее по горячему» [5]. Для исследования были изготовлены образцы 2 видов: по технологии «горячее по горячему» с предуплотнением нижнего слоя с нагрузкой 0,5 от нормативной и по технологии устройства методом «компакт–асфальт». Данные образцы оценивались по средней

плотности, водонасыщению по объему, трещиностойкости, пределу прочности при 50°C и сдвигоустойчивости. Результаты лабораторных исследований представлены в Табл.

Анализ, полученных в исследовании данных, показал, что образец, отформованный комбинированным методом, имеет водонасыщение меньше, чем образец с последовательной формовкой. Показатели трещиностойкости и предела прочности при 50°C у обоих образцов приблизительно одинаковые, однако при визуальном осмотре испытанных образцов имеются отличия. У образца, устроенного последовательной формовкой, после определения предела прочности при 50°C, наибольшее разрушение наблюдалось в нижнем слое, в то время как у второго – по всему объему.

Таблица. Результаты лабораторных испытаний образцов асфальтобетона, ЩМА-10, устроенных по технологии «горячее по горячему» и методом «компакт-асфальт»

Table. Results of laboratory tests of asphalt concrete samples, macadam and mastic asphalt concrete-10, constructed using the “hot-on-hot” technology and the “compact-asphalt” method

Тип асфальто-бетонной смеси	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение по объему, %	Трещиностойкость	Предел прочности при 50°C, МПа	Сдвигоустойчивость	
					Коэффициент внутреннего трения	Сцепление при сдвиге
ЩМА-10	2,47	1,05	3,2	1,2	0,96	0,31
Тип Б1	2,46	3,15	3,7	1,5	0,93	0,42
Образец №1	2,47	2,18	3,08	0,59	0,80	0,43
Образец №2	2,47	1,74	3,01	0,67	0,90	0,35
ГОСТ 9128	–	1,5–4,0	3,5–6,0	не менее 1,2	не менее 0,81	не менее 0,31
Гост 31015	–	1,0–4,0	2,5–6,0	не менее 0,65	не менее 0,93	не менее 0,18

Испытания по сдвигоустойчивости показали, что образцы, выполненные по технологии укладки методом «компакт-асфальт», имеют достаточно высокое значение коэффициента внутреннего трения, но низкое значение показателя сцепления. Таким образом, Л.А. Горелышева и И.С. Сахаров пришли к выводу, что образцы

из двухслойного асфальтобетонного покрытия, изготовленные способом «Компакт-асфальт», представляют собой единый монолит из различных типов асфальтобетонных смесей, и работающих, как один слой.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «КОМПАКТ-АСФАЛЬТ» В ДОРОЖНУЮ ОТРАСЛЬ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Несмотря на заявленные производителем преимущества технологии укладки асфальтобетонных слоев методом «компакт–асфальт», широкого применения на территории Российской Федерации она не получила по следующему ряду причин:

1. Большие габариты и громоздкость асфальтоукладочного комплекса. Для непосредственной укладки дорожного покрытия по технологии «компакт-асфальт» необходимо использование мобильного перегружателя (MF300C) и асфальтоукладочного комплекса (асфальтоукладчик DF145CS и модуль CM2500). Комбинированный мобильный перегружатель имеет собственный приемный бункер для попеременного приема и передачи смеси для нижнего и верхнего слоя покрытия. Конструкция данного бункера обеспечивает его полную очистку от смеси.

Асфальтоукладочный комплекс состоит из специального укладчика, имеющего два бункера для асфальтобетонной смеси и две выравнивающие плиты. Первая плита укладывает и уплотняет выравнивающий слой, вторая плита укладывает верхний слой сразу поверх выравнивающего слоя.

Суммарная длина используемой техники составляет порядка 32 метра, что допустимо для использования при строительстве автомобильных дорог, а также при реконструкции, капитальном ремонте и ремонте многополосных автомобильных дорог, где возможно обеспечить перекрытие не менее двух полос движения. Асфальтоукладочный комплекс представлен на рис.

2. Высокая стоимость оборудования. Возможность выгрузки смеси с помощью самосвала исключена, так как из-за большой высоты приемных бункеров асфальтоукладочного комплекса требуется мобильный перегружатель [6]. Ориентировочная стоимость асфальтоукладочного комплекса и мобильного перегружателя будет составлять порядка 500000 €.

Однако, сокращение толщины конструкции дорожной одежды и сроков производства работ при устройстве двух асфальтобетонных



Рис. Укладка асфальтобетонов с применением технологии «компакт-асфальт»

Fig. Laying asphalt concrete using compact asphalt technology

слоев за один проход асфальтоукладочным комплексом позволяет компенсировать высокую стоимость строительного оборудования.

3. Точная увязка транспортировки асфальтобетонной смеси автомобилями-самосвалами к месту производства работ. За счет одновременной укладки сразу двух асфальтобетонных слоев требуется одновременная транспортировка двух видов смеси к месту производства работ.

4. Малый объем данных лабораторных исследований. На этапе согласования проектной документации в главгосэкспертизе проектные организации часто сталкиваются с проблемой обоснования применения данной технологии. Отсутствуют опытные участки, нет практического подтверждения расчетов, скудный объем данных лабораторных исследований не позволяет в полной мере оценить и обосновать технико-экономическую эффективность применения технологии «компакт-асфальт».

Способствовать решению данных проблем можно за счет налаживания отечественного производства оборудования.

Следует также отметить, что в связи с отсутствием богатого опыта встает вопрос об организации приемочного контроля уложенных «пакетом» слоев дорожной одежды. Ввиду того, что в процессе уплотнения сразу двух асфальтобетонных слоев, верхний слой как бы «втапливается» в нижний слой, что при отборе кернов создаст проблему определения

фактической толщины каждого слоя отдельно. Определение гранулометрического состава, водонасыщения и прочности на сжатие и изгиб будет возможно только для общего керна. Поэтому, необходимо создание нормативно-технических документов, регламентирующих строительство и эксплуатацию автомобильных дорог, в части применения технологии «компакт-асфальт», в целях упрощения механизма согласования проектов, предусматривающих применение данной технологии.

ВЫВОДЫ

1. Технология «компакт-асфальт» позволяет достигнуть стабильного требуемого уплотнения, получить повышенное сцепление между слоями, сократить срок выполнения работ до 2-х раз, укладывать асфальт при низких температурах без потери качества и т.д. Данные достоинства технологии позволяют начать ее активное внедрение в Российской Федерации.
2. Недостаточный объем лабораторных исследований и отсутствие нормативно правовых документов осложняет возможность применения технологии устройства монолитных слоев дорожной одежды в нашей стране. Необходимо проведение сбора и анализа лабораторных исследований, строительство опытных участков, а также формирование нормативной и научно-технической базы для анализа технического эффекта и возможности применения данной технологии.

РЕКОМЕНДАЦИЯ

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета Андрей Николаевич Кудрявцев рекомендует данную статью к публикации.

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. ГОСТ 33220-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию. М.: Стандартинформ, 2016. Дата обращения:

- 10.09.2024. Режим доступа: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/6435/GOST33220-2015.pdf>
2. Войкина, А.С. Устройство асфальтобетонного покрытия с применением технологии компакт-асфальт // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2018. № 5. С. 28–30. EDN: WKFEMR
 3. Штарк А.И., Вахьянов Е.М. Возможность применения технологии компакт-асфальт в российских условиях. В кн.: X Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», Кузбасский ГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2018. EDN: XVGACL
 4. Компакт-асфальт на дорогах России Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: <https://www.wirtgengroup.com/ru-ru/products/voegele/technologies/inline-pave/>
 5. Сахаров И.С., Горельшева Л.А. Лабораторное исследование асфальтобетонного комбинированного дорожного покрытия по принципу «горячее по горячему» // Дороги и мосты. 2015. №1(33). С. 279-284. EDN: UYBLNF
 6. Dynapac Part of the Atlas Copco Group – Компакт-асфальт – новый стандарт укладки асфальта Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: http://псmt.рф/spectehnika/asfaltoukladchiki/kompaktasfalt/asfaltoukladchik_dynapac_kompakt-asfalt_CM3000/Compactasphalt_web.pdf
 7. ГОСТ Р 58401.16-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58401.16-19.pdf
 8. ГОСТ Р 58401.10-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности. М.: Стандартинформ, 2019. Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293729/4293729540.htm>
 9. ГОСТ Р 58401.8-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения содержания воздушных пустот. М.: Стандартинформ, 2019. Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293729/4293729542.htm>
 10. ГОСТ 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС). Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/436/43662.pdf>
 11. ГОСТ Р 58406.6-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения». М.: Стандартинформ, 2020. Дата обращения: 10.09.2024. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293721/4293721372.htm>
 12. ГОСТ Р 58406.4-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов плит вальцовым уплотнителем». М.: Стандартинформ, 2020. Дата обращения:

- 10.09.2024. Режим доступа: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58406.4-20.pdf
13. Войкина А.С., Вайнштейн В.М. Способы устройства асфальтобетонного покрытия методом «горячее по горячему» или «компакт-асфальт». В кн.: Россия и мир: национальная безопасность, вызовы и ответы в 2 частях; под общ. ред. В.П. Шалаева. ПГТУ, 2018. Т. 2. С. 180–183. EDN: XRAYHRf
 14. Веретенцев А.А. Способы устройства асфальтобетонного покрытия методом «горячее по горячему» // Научному прогрессу – творчество молодых. 2018. № 4. С. 126-128. EDN: YLWZQD
 15. Ищенко М.А., Перепелица П.В., Турдаков С.В. Технология асфальтирования «компакт-асфальт». В кн.: Наука и образование в социокультурном пространстве современного общества: сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции, КубГТУ, 2019. С. 51–53. EDN: MFHMKV

REFERENCES

1. GOST 33220-2015 Public roads. Operational requirements. Moscow: Standardinform, 2016. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/6435/GOST33220-2015.pdf>
2. Voykin AS. Construction of asphalt concrete pavement using compact asphalt technology. *Engineering personnel – the future of the innovative economy of Russia*. 2018;5:28-30. (In Russ.) EDN: WKFEMR
3. Shtark AI, Vakhyanov EM. Possibility of using compact asphalt technology in Russian conditions. In: *X All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists "YOUNG RUSSIA"*. Kuzbass State Technical University named after. T.F. Gorbachev; 2018. (In Russ.) EDN: XVGACL
4. Compact asphalt on Russian roads Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://www.wirtgengroup.com/ru-ru/products/voegele/technologies/inline-pave/>
5. Sakharov IS, Gorelysheva LA. Laboratory study of asphalt concrete combined road surface using the “hot on hot” principle. *Roads and bridges*. 2015;1(33):279–284. (In Russ.) EDN: UYBLNF
6. Dynapac Part of the Atlas Copco Group – Compact asphalt – a new standard for asphalt laying. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: http://psmt.rf/spectehnika/asfaltoukladchiki/kompaktasfalt/asfaltoukladchik_dynapac_kompakt-asfalt_CM3000/Compactasphalt_web.pdf
7. GOST R 58401.16-2019 Public automobile roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Methods for determining maximum density. M.: Standartinform, 2019. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58401.16-19.pdf
8. GOST R 58401.10-2019 Public automobile roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Methods for determining bulk density. M.: Standartinform, 2019. Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293729/4293729540.htm>

9. GOST R 58401.8-2019 Public automobile roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Method for determining the content of air voids. M.: Standartinform, 2019. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293729/4293729542.htm>
10. GOST 12801-98 Materials based on organic binders for road and airfield construction. Test methods. M.: Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Regulation and Certification in Construction (INTKS). (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data/436/43662.pdf>
11. GOST R 58406.6-2020 Public automobile roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Method for determining the tensile strength in bending and the maximum relative tensile strain.” M.: Standartinform, 2020. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: <https://meganorm.ru/Index2/1/4293721/4293721372.htm>
12. GOST R 58406.4-2020 “Public roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Preparation of sample slabs using a roller compactor.” M.: Standartinform, 2020. (In Russ.) Accessed: 10.09.2024. Available from: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58406.4-20.pdf
13. Voikina AS, Vainshtein VM. Methods for constructing asphalt concrete pavement using the «hot-on-hot» or “compact asphalt” method. In: *Russia and the world: national security, challenges and answers in 2 parts; under general ed. V.P. Shalaeva*. Perm State Technical University; 2018;2:180–183. (In Russ.) EDN: XRAYHR
14. Veretentsev AA. Methods for constructing asphalt concrete pavement using the «hot on hot» method. *Scientific progress – the creativity of the young*. 2018;4:126–128. (In Russ.) EDN: YLWZQD
15. Ishchenko MA, Perepelitsa PV, Turdakov SV. Technology of asphalt paving «compact-asphalt». In: *Science and education in the sociocultural space of modern society: collection of scientific papers based on the materials of the III International Scientific and Practical Conference*. Kuban State Technical University; 2019:51–53. (In Russ.) EDN: MFHMKV

Сведения об авторах:

Максимов Вадим Александрович, ¹ аспирант;

² Главный специалист, ФАУ «РОСДОРНИИ»;

eLibrary SPIN: 3498-3242; ORCID: 0009-0000-1881-6639;

E-mail: Maksimov.Vadim.007@ya.ru

Information about the author:

Vadim A. Maksimov, ¹ postgraduate student; ² Chief specialist, FAI “ROSDORNII”;

eLibrary SPIN: 3498-3242; ORCID: 0009-0000-1881-6639;

E-mail: Maksimov.Vadim.007@ya.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ
Направление – Техносферная безопасность

<https://doi.org/10.17816/transsyst636635>

© А.Б. Завьялов, Т.В. Глухих

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ МАЛОПОДВИЖНЫХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ ПУТЕМ УСТРАНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫБОРА ИМИ ПОЕЗДОВ

Цель. Улучшение качества обслуживания малоподвижных групп населения (МГН) на железнодорожном транспорте на территории северо-западного федерального округа для социализации данной группы населения с помощью предложения о включении дополнительного вагона со специальными местами для МГН и сопровождающих в поезда дальнего следования.

Материалы и методы. Статистический анализ количества МГН, пользующихся железнодорожным сообщением на территории СЗФО, анкетный опрос с привлечением общественных организаций, ассоциаций по вопросам МГН для выявления текущих недостатков, с которыми сталкиваются данная категория пассажиров в пути следования, предложение включить в поезда дальнего следования популярных среди населения маршрутов вагона с специальным купе для МГН и их сопровождающих.

Результаты. С помощью графической диаграммы построены связи между всеми участниками процесса включения дополнительного вагона с купе для МГН в состав поездов для упрощения процесса выбора необходимых поездов данной группой населения.

Заключение. Улучшение качества обслуживания, исключение необходимости заранее узнавать у перевозочной компании о наличии специальных купе для МГН и их сопровождающих в поездах дальнего следования, увеличение спроса на перемещение железнодорожным транспортом подтолкнет к решению проблем перемещения МГН на других видах транспорта

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; пассажиры; малоподвижные группы населения (МГН); анкетирование; барьеры; улучшение качества обслуживания.

Как цитировать:

Завьялов А.Б., Глухих Т.В. Совершенствование качества обслуживания малоподвижных групп населения на железнодорожном транспорте путем устранения дополнительных барьеров в процессе выбора ими поездов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 489–503. doi: 10.17816/transsyst636635

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Technosphere safety

© A.B. Zavyalov, T.V. Gluhih

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**IMPROVING THE QUALITY OF SERVICE FOR PERSONS
WITH REDUCED MOBILITY ON RAILWAY
TRANSPORTATION BY ELIMINATING ADDITIONAL
BARRIERS IN THE PROCESS OF THEIR CHOICE OF TRAINS**

Aim. To improve transportation quality of persons with reduced mobility (PRM) on railway transport in the North-Western Federal District, promoting their social inclusion by proposing the addition of a specialized car with designated seats for PRM and their companions on long-distance trains.

Materials and Methods. The study includes a statistical analysis of the number of disabled people using railway services in the NWFD, a questionnaire survey involving public organizations, and associations focused on disabled people to identify current shortcomings faced by PRM passengers. A proposal was developed to include a car with a special compartment for disabled people and their companions on popular long-distance routes.

Results. A graphical diagram was used to map the interactions between all parties involved in integrating a specialized car for PRM into the train system. This approach simplifies the process of identifying and selecting appropriate trains for PRM and their companions.

Conclusion. Introducing specialized compartments for PRM and their companions improves service quality, eliminates the necessity of confirming availability with the transport company in advance, and encourages greater use of rail travel. This initiative not only addresses key challenges faced by disabled travelers on railway services but also fosters solutions for their mobility on other types of transport.

Keywords: railway transportation; passengers; persons with reduced mobility (PRM); questionnaire; barriers; improving the quality of service.

To cite this article:

Zavyalov AB, Gluhih TV. Improving the quality of service for persons with reduced mobility on railway transportation by eliminating additional barriers in the process of their choice of trains. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):489–503. doi: 10.17816/transsyst636635

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обслуживания при перевозке малоподвижных групп населения (МГН) в последнее время становится все более актуальной как для Российской Федерации, так и для мира в целом. Интеграция людей с МГН в общество не может проходить без улучшения качества предоставляемых услуг, в том числе, перевозочными компаниями, путем адаптации окружающей среды к тем ограничениям, с которыми ежедневно сталкивается данная социальная группа. Чрезвычайно важно вовлечь данную категорию населения в социально-трудовую среду и экономическую среду [1].

В данной статье предлагается улучшить предлагаемые на железнодорожном транспорте услуги для МГН с учетом специфики их ограничений и потребностей путем анализа анкетного опроса, проведенного в РФ в 2023 году, а также анализа текущей ситуации на железнодорожном транспорте. Процедура выбора, заказа транспортного средства, в том числе поездов, является важным звеном в процессе транспортировки и перевозки ОВЗ на дальние расстояния. Для удобства восприятия этой процедуры был использована графическая модель бизнес-процесса и обозначения, которая наглядно демонстрирует связи между объектами и субъектами процесса выбора поезда с наличием дополнительного вагона со специальным купе для пассажиров МГН и их сопровождающих.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В ходе работы были изучены научные труды зарубежных коллег, занимавшихся проблемой перевозок МГН, в том числе физических барьеров и преград, с которыми ежедневно встречаются люди-инвалиды. Если говорить о железнодорожных перевозках, то главным барьером является сам поезд, точнее вагон; отсутствие в нем подъемника для пассажиров на инвалидных колясках вынуждает их подниматься по лестнице, что очень затруднительно.

Учитывая разницу между высотой платформы и высотой вагона, а также пространство между ними, заезд/выезд коляски МГН в вагон (из вагона) невозможен, следовательно, необходимо применять вспомогательные устройства для посадки и высадки малоподвижных людей. Помимо этого, не стоит забывать и о пригородных электропоездах, которыми часто пользуется данная категория инвалидов и также испытывает трудности при посадке и высадке [2].

Падзи Ф., Ибрахим Ф. [3] приходят к выводу, что проекты и формы предоставляемых услуг для МГН на большинстве станций хотя и присутствуют, но не всегда удобны в эксплуатации, создавая дополнительные барьеры и трудности в перевозке малоподвижных людей. Ду и др. [4] отмечают, что для улучшения качества железнодорожных перевозок ОВЗ необходимо учитывать приоритеты пассажиров, такие как наименьшее время ожидания поезда или иного транспортного средства, кратчайший путь при пересадке и гибкое планирование.

Также были проанализированы научные статьи о перевозках МГН на других видах транспорта, помимо ЖДТ. Если говорить об автобусах, то уже существуют математические модели, разрабатывается навигационное приложение для помощи людям с плохим зрением при использовании этого вида транспорта. Как пишет Чоговадзе [5], в этом приложении есть звуковые сигналы и ориентиры для МГН на протяжении всего маршрута, однако были и трудности. К основной можно отнести правильную идентификацию прибывающего к остановке автобуса, нахождение соответствующей двери на посадку т.к. несколько автобусных маршрутов могут иметь одинаковые специальные двери для посадки МГН.

В отрасли воздушных перевозок МГН также стоит отметить некоторые научные публикации. Так, Бадд Л. и Исон С. [6] в своей статье опираются на анкетные опросы для совершенствования предлагаемых услуг по удовлетворению потребностей МГН при использовании воздушного транспорта; Чанг с коллегами [7] уделяет внимание не только личностным особенностям пассажиров МГН, а также на экипаж самолета и персонал в аэропортах. Ученые сходятся во мнении, что операторы перевозок должны разработать и внедрить стандарты по обслуживанию МГН и предоставлению им необходимых услуг, чтобы не возникало дискриминации по возможностям использования воздушным транспортом между МГН и другими пассажирами. Кроме того, необходимо уделять внимание временно нетрудоспособным людям после травм и операций, чтобы и они могли на общих правах пользоваться всеми преимуществами такого вида передвижения. В трудах [8, 9] были приведены результаты опросов среди управляющими пристанями, владельцев морскими судами, экипажей, пассажиров, в т.ч. МГН, которые показали, что посадка и высадка малоподвижных круизных пассажиров вызывают наибольшие сложности, как и в случае железнодорожных перевозок.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О МГН, ПРОЖИВАЮЩИХ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ И ПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Важнейшей задачей транспортной отрасли любой страны является доступность транспорта для населения, в том числе и для людей с ограниченными возможностями, которым необходимы дополнительные средства для безопасного передвижения и адаптации к ограничениям в окружающей их среде. К людям с ограниченными возможностями можно отнести следующие категории населения:

- люди с проблемами со слухом;
- люди с проблемами со зрением;
- люди с нарушением опорно-двигательного аппарата;
- люди на креслах-колясках;
- люди с умственными и психическими отклонениями;
- пожилые и старые люди (старше 60 и 75 лет соответственно).

По данным Росстата [10], на территории РФ проживает около 11 млн людей с ограниченными возможностями, это примерно 8% населения, при этом количество малоподвижных групп населения (МГН), проживающее на территории Северо-Западного федерального округа (СЗФО), составляет 1,33 млн ОВЗ по состоянию на 31.12.2023. На Рис. 1 показано что, начиная с 2013 года происходит постоянный рост количества МГН, вызванный в т.ч. пандемией коронавируса и СВО. Все люди с ограниченными возможностями имеют по закону право на пенсию,



Рис. 1. Количество МГН, проживающих в СЗФО в 2013–2023 гг.

Fig. 1. Number of people with disabilities living in the Northwestern Federal District in 2013–2023

за последние года также виден прирост получателей пенсии по старости и инвалидности.

Все перевозки МГН на железнодорожном транспорте в СЗФО осуществляются Северо-Западной пригородной пассажирской компанией (СЗППК). Как видно из Рис. 2, за последнее десятилетие происходит рост спроса на пользование МГН железнодорожным транспортом. Стоит отметить последние 2 года, где прирост перевозок МГН железнодорожным транспортом составил 4570 и 7420 пассажиров соответственно. Для социальной интеграции МГН в общество, в трудовой процесс необходимо прикладывать усилия для устранения препятствий и барьеров в любых средствах транспорта, в частности, железнодорожном, и обустройстве специальных пассажирских зон для МГН [11].

Проанализировав динамику пассажирских перевозок МГН за последнее десятилетие, можно сделать вывод, что СЗППК обращает внимание на адаптацию своих субъектов к специфическим потребностям данной категории граждан. Необходимость поездок в специальные медицинские учреждения, расположенные в Санкт-Петербурге, вынуждает многих людей с ограниченными возможностями, проживающих в близлежащих областях, пользоваться железнодорожным транспортом. Для того, чтобы МГН комфортно пользовались железнодорожным транспортом, необходимо тесное сотрудничество между перевозочной компанией, центром содействия мобильности и общественными организациями, занимающимися проблемами инвалидов, такими как Союз Инвалидов России, Всероссийское Общество Инвалидов и др [12].

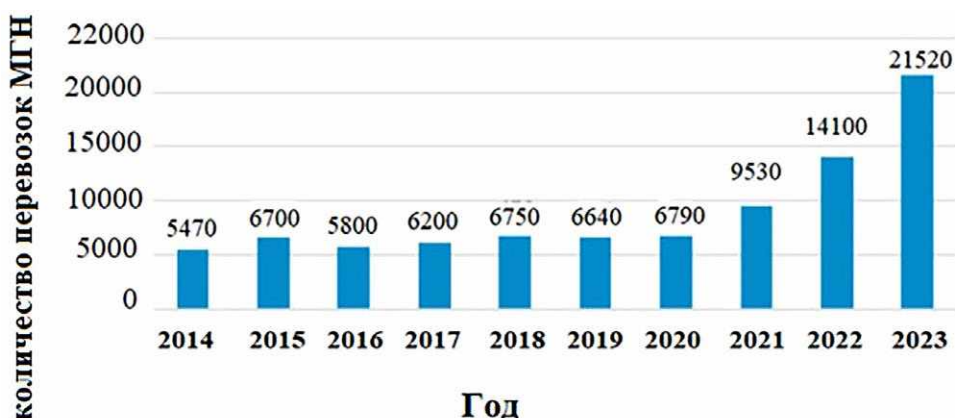


Рис. 2. Динамика количества перевозок МГН на железнодорожном транспорте в СЗФО в период с 2014 по 2023 год

Fig. 2. Dynamics of the number of transportations of disabled people by rail in the Northwestern Federal District in the period from 2014 to 2023

АНКЕТНЫЙ ОПРОС

В прошлом году проводилось анкетирование людей с ограниченными возможностями в крупнейших городах СЗФО, таких как Санкт-Петербург, Архангельск, Вологда, Петрозаводск с привлечением общественных организаций по делам МГН. Было опрошено более 3000 респондентов, которые отвечали на 12 вопросов. Ниже приведены наиболее значимые из них для поднятой в статье проблематики.

Один из вопросов спрашивал людей о самом большом неудобстве при поездках на железнодорожном транспорте предлагал следующие варианты:

- доступы к месту посадки;
- посадка в вагон поезда;
- высадка из вагона;
- доступы к туалету;
- микроклимат в салоне поезда;
- плохое качество обслуживания персоналом в поезде.

На Рис. 3 показано соотношение в процентах между ответами на данный вопрос. Стоит отметить, что отвечающие могли выбрать несколько ответов, что, по их мнению, является наибольшим затруднением во время поездки. Как видно из диаграммы, наиболее затруднительны посадка и высадка МГН в вагон/из вагона. В большей степени эти неудобства связаны с пространством между наружными дверьми и перроном.

Еще один вопрос посвящался неудачному опыту анкетизируемого во время поездок на поездах и основным неудобствам внутри вагона,



Рис. 3. Основные неудобства, которые испытывают МГН в поезде

Fig. 3. The main inconveniences experienced by people with disabilities on the train

среди которых значились такие варианты ответов, как: техническое оснащение вагона,

- неудобный туалет;
- обслуживающий персонал;
- неудобство непосредственно занимаемого места в вагоне;
- другое, в которое респонденты могли указать конкретные причины.

Результаты опроса представлены на Рис. 4. Наиболее частыми в ответе «Другое», который указали 6% опрошенных, были указаны:

- занятие мест для МГН лицами, не имеющими оформленной инвалидности;
- затруднительный и долгий процесс заказа транспорта для малоподвижных пассажиров в колясках;



Рис. 4. Неудачный опыт МГН при пользовании железнодорожным транспортом

Fig. 4. Unsuccessful experience of people with disabilities using railway transport



Рис. 5. Уровень осведомленности о подходящих пересадках

Fig. 5. Level of awareness of suitable transplants

- неисправность или отсутствие лифта для инвалидных колясок;
- нетолерантное отношение к МГН со стороны других пассажиров.

Также в анкете был задан вопрос об осведомленности МГН о подходящих им безбарьерных пересадках и только 19% опрошенных ответили утвердительно (Рис. 5). Больше половины анкетированных МГН ответило, что не имеют достаточной информации о безбарьерных пересадках.

ПРОЦЕСС ЗАКАЗА МАЛОПОДВИЖНЫМИ ГРУППАМИ НАСЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО ПОЕЗДА

В соответствие с распоряжением №1827/р ОАО «РЖД» должен обеспечивать необходимые условия доступной среды для малоподвижных пассажиров из числа МГН, в том числе, функционирует Центр содействия мобильности ОАО «РЖД», имеются в наличии около 1000 вагонов со специализированным купе для МГН. Наиболее комфортабельные поезда для поездок ОВЗ – «Сапсан», «Ласточка», «Стриж».

Однако не все поезда дальнего следования оснащены вагонами со специализированным купе. Давайте рассмотрим более подробно процесс заказа малоподвижным пассажиром услуги на поездку в поезде. Запрос от МГН поступает в договорной центр содействия мобильности ОАО «РЖД», который включает выбор поезда по нужному маршруту. В том случае, если выбранный поезд не имеет специального вагона с обустроенным для малоподвижного пассажира и сопровождающего купе, заказ передается управляющему процессами перевозок в региональном подразделении Федеральной пассажирской компании (СЗППК). Далее поднимается вопрос, есть ли в наличии подразделения дополнительный вагон со специальным купе и возможно ли его присоединить к выбранному поезду или нет. В случае одобрения происходит сцепка вагона с основным составом, оповещается поездной персонал, проверяется исправность подъемника для инвалидных колясок. После этого информация о присоединении или не присоединении дополнительного вагона идет в договорной центр содействия и через него заказчику после чего процесс заказа считается завершенным.

Весь процесс представлен графически на Рис. 6, зеленый и красный круги показывают начало и конец процесса, конверт – момент получения заказа контактным центром мобильности, желтый ромб – ожидание завершения параллельных процессов, зеленый ромб – возможность доступности специального вагона.

Как показывало проведенное анкетирование, многие респонденты из МГН мало информированы о наличии в перевозочной компании дополнительных вагонов со специализированным купе для малоподвижных граждан и их сопровождающих, что вызывает невысокий спрос на пользование МГН железнодорожным транспортом. Обычно данная категория граждан пользуется железными дорогами 1–2 раза в год [13]. Для увеличения объемов перевозок МГН перевозочная компания должна развивать маркетинговое продвижение своих услуг для развития безбарьерного железнодорожного туризма.

Предлагается включение вагонов со специальным купе для малоподвижных пассажиров во все поезда дальнего следования, а желательно и в пригородные электропоезда. При наличии одного такого вагона в поездах, курсирующих по наиболее привлекательным для туристов маршрутам, предлагается включение второго вагона. Важным моментом является информирование МГН о наличии или увеличении в поездах специальных мест, сократив тем самым, время выбора и заказа инвалидом нужного поезда [14]. Тем самым можно увеличить спрос на предоставляемые ФПК услуги большой социальной группы. Помимо этого, важно наладить обратную связь с МГН, проанализировать обращения, жалобы, пожелания малоподвижных пассажиров и их сопровождающих. Все это повысить качество обслуживания и МГН в частности, и других

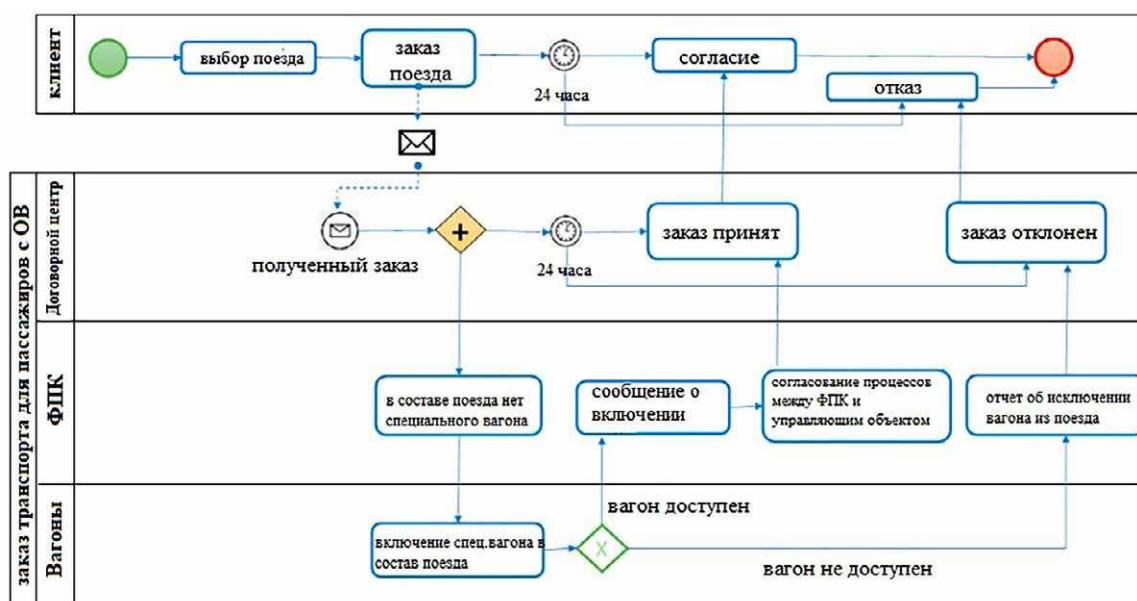


Рис. 6. Диаграмма процесса заказа поезда малоподвижным пассажиром

Fig. 6. Diagram of the process of ordering a train by a passenger with limited mobility

пассажиров в целом. Необходимо систематизировать обучение персонала по обслуживанию МГН, минимизировать количество барьеров во время поездки.

Перевозочная компания также должна оценить экономическую составляющую, решить, что выгоднее – переоборудовать старые вагоны под специальные для МГН либо закупать новые. ФПК также может рассмотреть возможность покупки подержанных вагонов у иностранных перевозчиков или долгосрочной аренды. Помимо этого, необходимо проанализировать наличие свободных мест в депо под эти дополнительные специальные вагоны.

Социальная функция дочерней компании ОАО «РЖД» – Федеральной пассажирской компании состоит, в том числе, в интеграции малоподвижных граждан в перевозочный процесс. Устранение причин неудобства в поездках, высокое качество обслуживания пассажиров МГН, постоянная обратная связь с МГН, в том числе путем опросов и анкетирования, маркетинговые исследования помогут людям с ограниченными возможностями пользоваться предоставляемыми ОАО «РЖД» услугами наравне с другими людьми, что несомненно поможет им интегрироваться в общественную жизнь и не чувствовать себя отрезанными от социума. Кроме того, это подтолкнет и другие транспортные отрасли к совершенствованию своей доступной среды для МГН, повышению эргономичности пассажирских мест и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья поднимает проблему в процессе перевозок малоподвижных пассажиров из числа МГН железнодорожным транспортом на примере Северо-Западного федерального округа и Федеральной пассажирской компании. Целью статьи было упрощение передвижения МГН на поездах путем анализа выявленных недостатков и барьеров в пути следования МГН на основе проведенного анкетирования. Была приведена текущая статистика МГН по северо-западному федеральному округу и результаты опросного исследования на предмет выявления основных затруднений для МГН в процессе их поездок и уровня их информирования о предлагаемых ФПК услугах для данной категории граждан.

Кроме того, был описан процесс заказа МГН билетов в специально предназначенные для них купе в отдельных вагонах поездов. Для упрощения этого процесса предлагается присоединить в те составы поездов, которые ходят по маршрутам с наибольшим пассажиропотоком,

специально оборудованные вагоны для малоподвижных пассажиров или дополнить их еще одним таким вагоном в случае наличия. Это ускорит процесс выбора нужного поезда, повысит комфортабельность и качество предлагаемых услуг.

Совершенствование инфраструктуры подвижного состава ФПК поддерживает тенденцию развития доступной среды для МГН, увеличивает пассажиропоток этой социальной группы. Путешествуя в адаптированных к их потребностям условиях, малоподвижные люди могут получать удовольствие от поездок, совмещая туристические цели и используя специально организованные для них купе как место досуга и отдыха. Однако без интегрированного взаимодействия всех участников развития безбарьерной среды на всех этапах перемещения МГН, комплексного формирования этой среды при организации перевозок невозможно достичь высокого уровня адаптации туристической отрасли к ограниченным возможностям достаточно большой и очень важной социальной группы людей [15].

РЕКОМЕНДАЦИЯ К ПУБЛИКАЦИИ

Доктор медицинских наук, профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I Копытенкова Ольга Ивановна рекомендует данную статью к публикации.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. В настоящей статье опубликованы результаты анкетного опроса людей с ограниченными возможностями в городах: Санкт-Петербург, Архангельск, Вологда, Петрозаводск, Псков. Все участники анкетирования дали согласие на использование результатов опроса в данном научном исследовании.

The authors declare that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article publishes the results of a questionnaire survey of people with disabilities in the following cities: St. Petersburg, Arkhangelsk, Vologda, Petrozavodsk, Pskov. All survey participants gave their consent for the use of survey results in this scientific study.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Завьялов А.Б. Эргономический анализ рабочего места человека с ограниченными возможностями с применением интерактивных средств // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 1. С.153–158. Доступно

- по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_65668277_96658456.pdf Ссылка активна на 18.09.2024. EDN: ZUEVPR
2. Dejeammes M. Boarding aid devices for disabled passengers an heavy rail. Evaluation of accessibility. In: Railroad Track Engineering snd Maintenance; Passenger Rail Planning and Operations: Rail. Transportation Research Record. 79th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board. 2000. N 1713. P. 48–55. doi: 10.3141/1713-07
 3. Padzi F.A., Ibrahim F. Accessibility of Visually Impaired Passengers at Urban Railway Stations in the Klang Valley. International Transaction Journal of Engineering Management & Applied Sciences & Technologies. 2012. Vol. 3, N 3. P. 277–292. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.306
 4. Du J.B., Qiao F.X., Yu L. Improving Bus Transit Services for Disabled Individuals: Demand Clustering, Bus Assignment, and Route Optimization. IEEE ACCESS. 2020. N 8. P. 121564–121571. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007322
 5. Chogovadze J., Gogiashvili P., Lekveishvili G., Kbilashvili D., Mardaleishvili N. Mathematical Modeling of the Motion Parameters of a Disabled Person in a Bus. Transport Problems. 2020. Vol. 15, N 1. P. 49–59. doi: 10.21307/tp-2020-005
 6. Budd L., Ison S. Supporting the needs of special assistance (including PRM) passengers: An international survey of disabled air passenger rights legislation. Journal of Air Transport Management. 2020. N 87. P. 114–118. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101851
 7. Chang Y.C., Chen C.F. Meeting the needs of disabled air passengers: Factors that facilitate help from airlines and airports. In: Tourism Management. 2012. Vol. 33, N 3. P. 529–536. doi: 10.1016/j.tourman.2011.06.002
 8. Paananen K., Minoia P. Cruisers in the City of Helsinki: staging the mobility of cruise passengers. Tourism Geographies. 2019. Vol. 21, N 5. P. 801–821. doi: 10.1080/14616688.2018.1490341
 9. Chou C.C., Tsai C.L., Wong C.P. A Study on Boarding Facilities on Wharves and Ships for Disabled and Elderly Passengers Using Public Shipping Transport. Journal Of Transport & Health. 2020. N 18. P. 185–198. doi: 10.1016/j.jth.2020.100895
 10. Федеральная служба государственной статистики. Доступно по: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964>. Ссылка активна на 18.09.2024.
 11. Timakova R.T., Ilyukhina Yu.V. Modern trends of sustainable development of “accessible environment” on the railway transport. Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies. 2022. Vol. 84, N 1. P. 410–417. doi: 20914/2310-1202-2022-1-410-417 EDN: SMUTMG
 12. Терехова И.Р., Леванчук Л.А. Эвакуация маломобильных групп населения при возникновении пожароопасных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта // В сборнике: Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность 2020). Материалы II Международной научно-практической конференции. 2020. С. 221–225. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42776313_68801247.pdf Ссылка активна на 18.09.2024. EDN: WUGAKW
 13. Terentyev Yu.A., Filimonov V.V., Malinetskiy G.G. Russia integrated transit transport system basid on vacuum magnetic levitation transport. Transportation Systems and Technology. 2018. Vol. 4, N 3. P. 57–84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84

14. Kanonin Yu.N. Safety issues in the operation of highly automated vehicles. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2024. Vol. 21, N 1. P. 76–84. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-76-84 EDN: ITCNAG
15. Ershova S., Orlovskaya T., Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463, N 4. P. 042040. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042040 EDN: UQGSZQ

REFERENCES

1. Zavyalov AB. Ergonomic analysis of the workplace of a person with disabilities using interactive tools / *Avtomobil'nye dorogi i transportnaya infrastruktura*. 2024;1:153–158. (In Russ.) [cited 2024 September 18]. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_65668277_96658456.pdf EDN: ZUEVPR
2. Dejeammes M. Boarding aid devices for disabled passengers an heavy rail. Evaluation of accessibility. In: *Railroad Track Engineering and Maintenance; Passenger Rail Planning and Operations: Rail. Transportation Research Record. 79th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board*. 2000;1713:48–55. doi: 10.3141/1713-07
3. Padzi FA, Ibrahim F. Accessibility of Visually Impaired Passengers at Urban Railway Stations in the Klang Valley. *International Transaction Journal of Engineering Management & Applied Sciences & Technologies*. 2012;3(3):277–292. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.306
4. Du JB, Qiao FX, YuL. Improving Bus Transit Services for Disabled Individuals: Demand Clustering, Bus Assignment, and Route Optimization. *IEEE ACCESS*. 2020;8:121564–121571. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007322
5. Chogovadze J, Gogiashvili P, Lekveishvili G, Kbilashvili D, Mardaleishvili N. Mathematical Modeling of the Motion Parameters of a Disabled Person in a Bus. *Transport Problems*. 2020;15(1):49–59. doi: 10.21307/tp-2020-005
6. Budd L, Ison S. Supporting the needs of special assistance (including PRM) passengers: An international survey of disabled air passenger rights legislation. *Journal of Air Transport Management*. 2020;87:114–118. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101851
7. Chang YC, Chen CF. Meeting the needs of disabled air passengers: Factors that facilitate help from airlines and airports. In: *Tourism Management*. 2012;33(3):529–536. doi: 10.1016/j.tourman.2011.06.002
8. Paananen K, Minoia P. Cruisers in the City of Helsinki: staging the mobility of cruise passengers. *Tourism Geographies*. 2019;21(5):801–821. doi: 10.1080/14616688.2018.1490341
9. Chou CC, Tsai CL, Wong CP. A Study on Boarding Facilities on Wharves and Ships for Disabled and Elderly Passengers Using Public Shipping Transport. *Journal Of Transport & Health*. 2020;18:185–198. doi: 10.1016/j.jth.2020.100895
10. Federal State Statistics Service. [Internet]. (In Russ.) [cited 2024 September 18]. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/13964>
11. Timakova RT, Ilyukhina YuV. Modern trends of sustainable development of “accessible environment” on the railway transport. *Bulletin of Voronezh*

- State University of Engineering Technologies*. 2022;84(1):410–417. doi: 20914/2310-1202-2022-1-410-417 EDN: SMUTMG
12. Terekhova IR, Levanchuk LA. Evacuatoin of small-mobility groups in the event of fire hazardous situations at railway transport facilities / *V sbornike: Problemy obespecheniya bezopasnosti (Bezopasnost' 2020). Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2020:221–225. (In Russ.) [cited 2024 September 18]. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42776313_68801247.pdf EDN: WUGAKW
13. Terentyev YuA, Filimonov VV, Malinetskiy GG. Russia integrated transit transport system basid on vacuum magnetic levitation transport. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(3):57–84. doi: 10.17816/transsyst201843s157-84
14. Kanonin YuN. Safety issues in the operation of highly automated vehicles. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2024;21(1):76–84. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-76-84 EDN: ITCNAG
15. Ershova S, Orlovskaya T, Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018;463(4):042040. doi: 10.1088/1757-899X/463/4/042040 EDN: UQGSZQ

Сведения об авторах:

Завьялов Алексей Борисович, ассистент;
eLibrary SPIN: 4123-8950; ORCID: 0009-0008-6160-455X;
E-mail: alzav1310@gmail.com
Глухих Татьяна Владимировна, студент;
ORCID: 0009-0001-6422-8421;
E-mail: gluhih_tv@mail.ru

Information about the authors:

Alexey Zavyalov, Assistant;
eLibrary SPIN: 4123-8950; ORCID: 0009-0008-6160-455X;
E-mail: alzav1310@gmail.com
Tatyana Gluhih, Student;
ORCID: 0009-0001-6422-8421;
E-mail: gluhih_tv@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электрофизика, электрофизические установки

<https://doi.org/10.17816/transsyst637451>

© А.А. Кузнецов, А.В. Пономарев, А.В. Горлов, М. А. Волчанина
Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Обоснование. В статье рассматривается применение вейвлет-преобразования для обработки акустических сигналов при диагностировании силовых трансформаторов с использованием имитатора с различным набором дефектов. Рассмотрены особенности применения непрерывного вейвлет-преобразования на конкретном примере, описан алгоритм получения эталонных сигналов для распознавания вида дефекта.

Цель. Разработка математической модели построения эталонных сигналов акустического контроля при обработке данных от имитатора различных дефектов и последующего распознавания дефектов на реальных силовых трансформаторах во время их эксплуатации.

Материалы и методы. Получение акустических сигналов от имитатора дефектов и реальных трансформаторов при помощи автоматизированных систем акустического контроля. Обработка данных при помощи вейвлет преобразования, получение скейлограмм, сравнение результатов преобразования эталонных сигналов и сигналов силовых трансформаторов для выявления вида дефекта и степени его развития.

Результаты. Представлены выражения для преобразования сигналов, показаны сигналы акустического контроля, формирование эталонных сигналов, распознавание наиболее близких сигналов по форме, соответствующие различным видам дефектов.

Заключение. Показан подход формирования методики обработки сигналов акустического контроля, позволяющего воспроизводить различные дефекты изоляции силовых трансформаторов, распознавания подобных дефектов по предложенным параметрам вейвлет преобразования.

Ключевые слова: силовые трансформаторы; диагностирование; дефекты изоляции; акустический контроль; вейвлет-преобразование.

Как цитировать:

Кузнецов А.А., Пономарев А.В., Горлов А.В., Волчанина М.А. Применение вейвлет-преобразования для распознавания акустических сигналов различных дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10. № 4. С. 504–516. doi: 10.17816/transsyst637451

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrophysics, electrophysical installations

© A.A. Kuznetsov, A.V. Ponomarev, A.V. Gorlov, M.A. Volchanina

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM FOR RECOGNITION OF ACOUSTIC SIGNALS OF VARIOUS DEFECTS OF POWER TRANSFORMERS

Background: This study discusses the use of wavelet transform for processing acoustic signals when diagnosing power transformers. A simulator with various defects was used to explore the application of continuous wavelet transform. The study also outlines an algorithm for obtaining signal standards to identify different types of defects.

Aim. To develop a mathematical model for constructing reference acoustic control signals when processing data from a simulator with various defects. These signals will be used to identify and diagnose defects in real power transformers during their operation.

Methods. The study introduces expressions for signal transformation, presents acoustic control signals, and explains the formation of reference signals. It also describes the process of recognizing the closest signals in form, corresponding to different types of defects.

Results. The key results include expressions for signal transformation, acoustic control signals, and the formation of reference signals. The closest matching signals were identified, enabling accurate recognition of different defect types.

Conclusion. The research proposes a method for processing acoustic control signals, allowing the reproduction of various insulation defects of power transformers and the recognition of such defects according to the proposed parameters of the wavelet transform.

Keywords: power transformers; diagnostics; insulation defects; acoustic control; wavelet transform.

To cite this article:

Kuznetsov AA, Ponomarev AV, Gorlov AV, Volchanina MA. Application of wavelet transform for recognition of acoustic signals of various defects of power transformers. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):504–516. doi: 10.17816/transsyst637451

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при диагностировании состояния изоляции высоковольтных трансформаторов широко применяется акустический метод контроля. К достоинствам приборов акустического контроля, выделяющим их среди других методов контроля, можно отнести: мобильность, позволяющую легко переносить прибор к различным объектам; информативность, выражающуюся в высокой чувствительности при начальном уровне сигналов; селективность, заключающуюся в способности определять координаты источника сигнала.

Вместе с тем остаются проблемы в распознавании вида и степени развития дефекта по форме зарегистрированных акустических сигналов.

В работе рассматривается применение вейвлет-преобразования для обработки акустических сигналов, зарегистрированных системой СЦАД-16 [1] при диагностировании силовых трансформаторов [2, 3] с использованием имитатора с различным набором дефектов [4, 5].

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Электрические сигналы, полученные от системы СЦАД-16, не стационарны. Для их анализа не подходит стандартное преобразование Фурье, которое предполагает периодичность и стационарность сигнала. Одним из вариантов решения данной проблемы может быть применение оконного преобразования Фурье, так как оно как раз учитывает динамику изменения сигнала. Но в силу постоянства ширины окна преобразования (которая не зависит от частоты, для которой выполняется преобразование) получаем низкую детализацию на высоких частотах [6, 7].

Более удобным методом анализа подобных сигналов является вейвлет-преобразование (ВП), которое в зависимости от решаемой задачи может быть дискретным (Discrete Wavelet Transform, DWT) или непрерывным (Continuous Wavelet Transform, CWT) [8].

В основе ВП лежит некоторая функция $\psi(t)$, обладающая свойством локальности:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

В этом случае непрерывным ВП функции $x(t)$ будет являться функция двух аргументов:

$$CWT_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

где a – масштабирующий коэффициент (обратно пропорционально связан с частотой вейвлет-функции); b – временной сдвиг (определяет локализацию вейвлет-функции по времени).

Таким образом, принцип анализа некоторого сигнала на основе непрерывного ВП заключается в том, чтобы построить так называемую скейлограмму и найти на ней особенности, присущие данному сигналу.

Скейлограмма представляет из себя трехмерную плоскость, у которой в основании координаты каждой точки определяют рассматриваемый масштаб вейвлет-функции и тот момент времени, в который рассматривается связь этой функции с заданным сигналом. По вертикали откладывается величина этой связи (сильно или слабо выражена вейвлет-функция заданного масштаба в конкретно заданный момент времени).

Для удобства трехмерную плоскость иногда заменяют соответствующей ей двумерной картой, на которой степень выраженности конкретной вейвлет-функции в данный момент времени отображается соответствующим цветом.

Например, рассмотрим сигнал, представляющий собой синусоиду с частотой 5 Гц на интервале от 0 до 2047 мс. На интервале [300; 500] мс к сигналу добавляется синусоида с частотой 20 Гц, а на интервале [400; 500] к ним добавляется еще одна синусоида частотой 100 Гц. В итоге сигнал принимает вид:

$$f(t) = \begin{cases} 20 \sin(2\pi 5t), & 0 \leq t < 0,3, \\ 20 \sin(2\pi 5t) + 20 \sin(2\pi 20t), & 0,3 \leq t < 0,4, \\ 20 \sin(2\pi 5t) + 20 \sin(2\pi 20t) + 20 \sin(2\pi 100t), & 0,4 \leq t < 0,5, \\ 20 \sin(2\pi 5t), & t \geq 0,5; \end{cases}$$

где время t указано в секундах. График функции представлен на Рис 1.

Скейлограмма данной функции будет зависеть от вида и параметров материнского вейвлета [9]. Например, для комплексного вейвлета Morlet

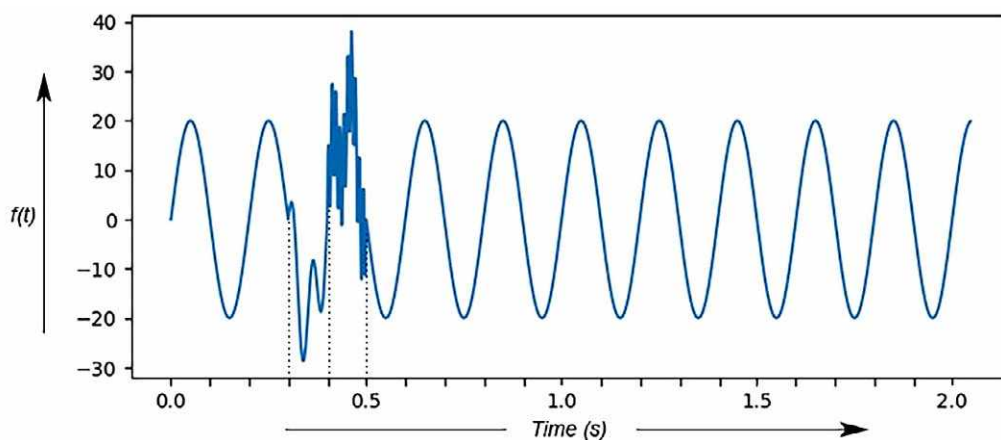


Рис. 1. Пример исследуемой функции

Fig. 1. Example of the function under study

в диапазоне масштабов (0;400] скейлограмма принимает вид, приведенный на Рис. 2.

Изображение скейлограммы на двумерной плоскости на основе цветового отображения высоты графика позволяет более четко выделять области с интересующими параметрами. Например, для скейлограммы, приведенной на Рис. 2, двумерное представление будет иметь вид Рис. 3.

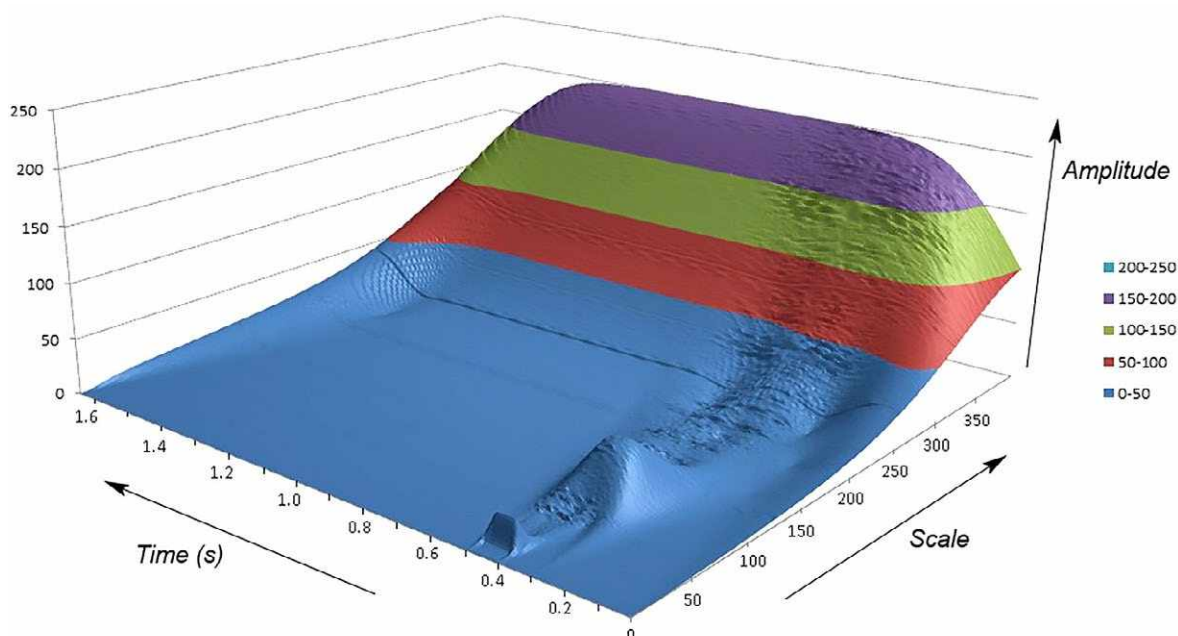


Рис. 2. Трехмерное представление скейлограммы приведенного сигнала

Fig. 2. Three-dimensional representation of the scalegram of the reduced signal

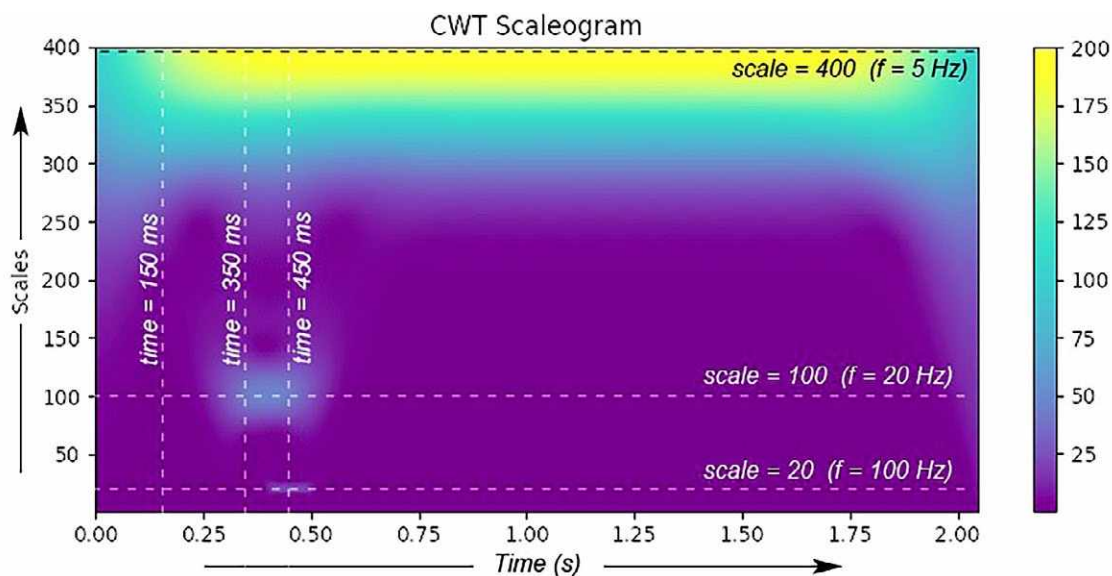


Рис. 3. Двумерное представление скейлограммы исследуемого сигнала с обозначением линий временных и масштабных срезов

Fig. 3. Two-dimensional representation of the scalegram of the signal under study with the designation of time and scale slice lines

На скейлограмме хорошо видно, что высокочастотная составляющая сигнала ($scale = 20$) проявляется в диапазоне (400; 500) мс и определена она с высокой детализацией. Низкочастотная составляющая сигнала ($scale = 400$) определена на протяжении всего времени существования сигнала, но ее детализация достаточно низкая.

Для получения более детальной информации и удобства обработки данных можно рассмотреть срезы скейлограммы в той или иной плоскости. Например, если посмотреть на срезы при $t = 150, 350$ и 450 мс, то можно заметить изменения в частотном составе сигнала, что показано на Рис. 4.

По срезу скейлограммы при фиксированном масштабе можно выявлять временные промежутки, когда та или иная составляющая сигнала проявляется наиболее ярко. Например, при масштабах 20, 100 и 400, соответствующих имеющимся в сигнале частотам 100, 20 и 5 Гц, видим графики, приведенные на Рис. 5.

Таким образом, непрерывный вейвлет-анализ сигнала позволяет эффективно исследовать локальные изменения в частотном составе сигнала [10]. Этот факт можно применить, например, для анализа акустических сигналов, возникающих при частичных разрядах силовых трансформаторов.

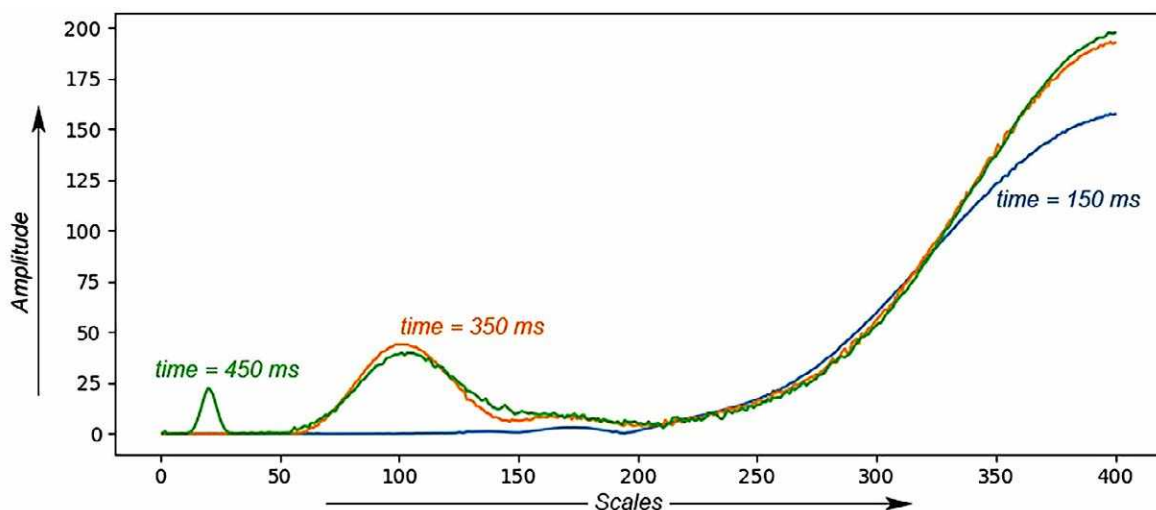


Рис. 4. Срезы скейлограммы при $t = 150$ мс, $t = 350$ мс и $t = 450$ мс

Fig. 4. Slices of the scalegram at $t = 150$ ms, $t = 350$ ms and $t = 450$ ms

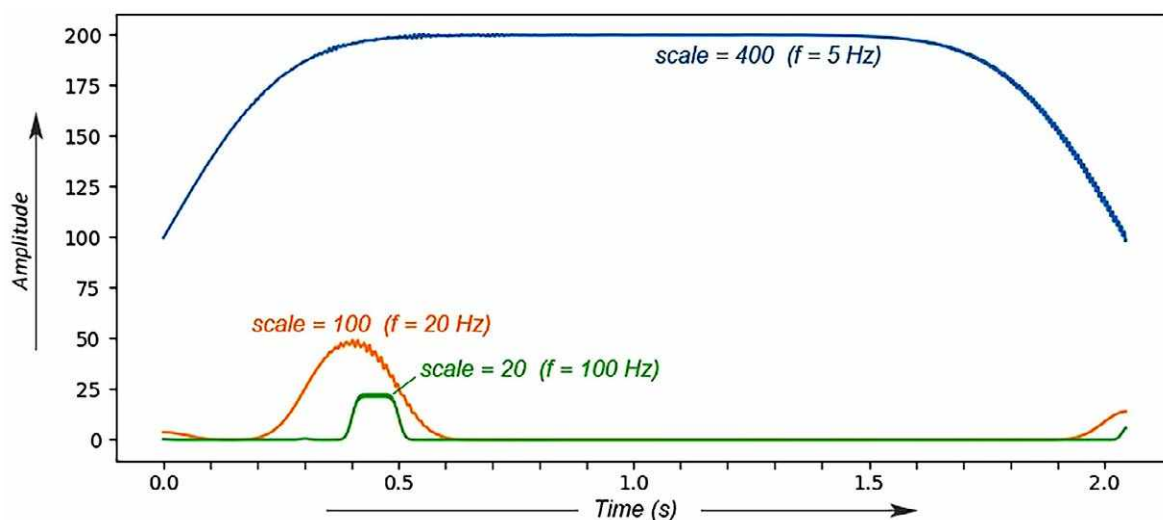


Рис. 5. Временные срезы скейлограммы при трех основных масштабах

Fig. 5. Time slices of the scalegram at three main scales

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

С помощью разработанного ИРНД с использованием четырех каналов СЦАД-16 были получены сигналы различных видов дефектов. Например, один из сигналов, имитирующий пробой изоляции, фиксировался тремя каналами: 1, 2 и 4. Сигналы, зафиксированные на каждом из каналов, представлены на Рис. 6.

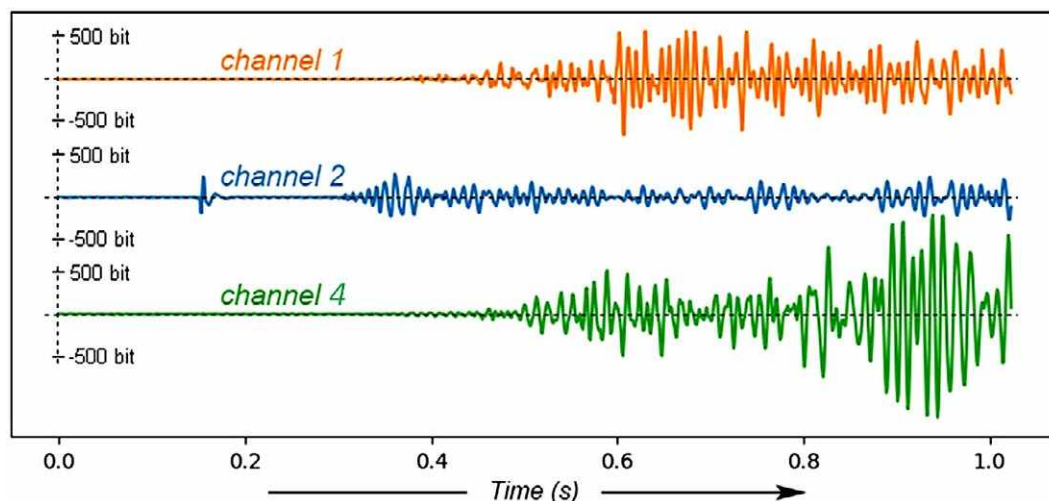


Рис. 6. Акустические сигналы, зафиксированные при имитации дефекта «пробой изоляции»

Fig. 6. Acoustic signals recorded during the simulation of the defect «insulation breakdown»

При применении к данным сигналам непрерывного вейвлет-преобразования с материнским вейлетом «Мексиканская шляпа» получены скейлограммы, приведенные на Рис. 7.

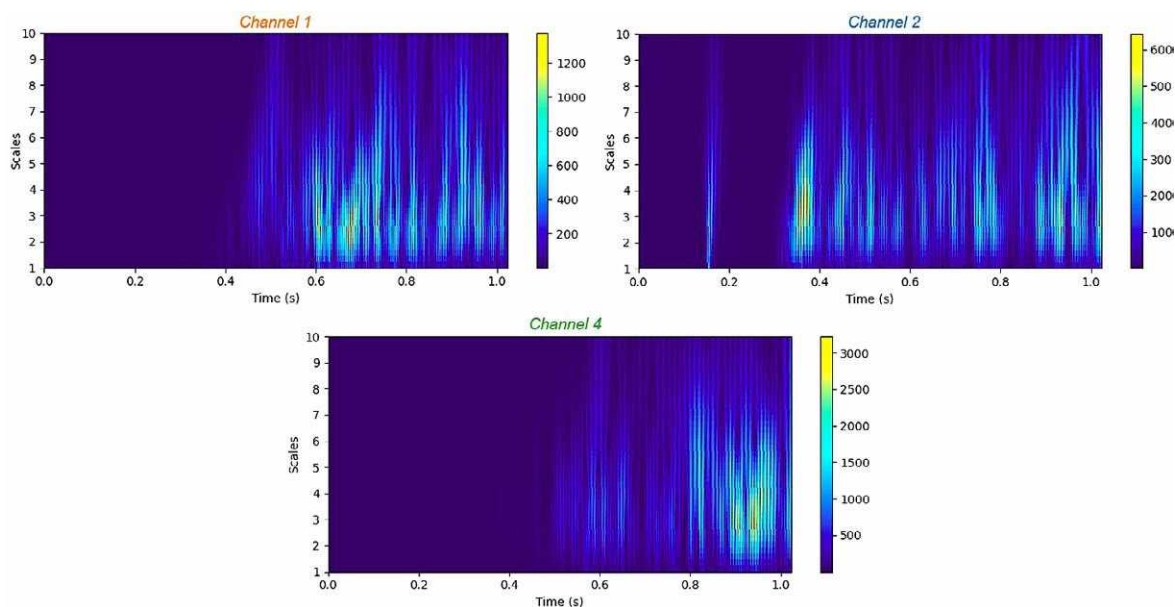


Рис. 7. Скейлограммы акустических сигналов, зафиксированных при имитации дефекта «пробой изоляции»

Fig. 7. Scalegrams of acoustic signals recorded during the simulation defect «insulation breakdown»

По приведенным скейлограммам видно, что наиболее информативные яркие области зафиксированы при масштабе $\text{scale} = 3$, что соответствует частоте около 330 Гц (соответствие масштаба и частоты определяется видом материнского вейвлета). Также на Рис. 7 хорошо виден локальный всплеск на втором канале, что является одной из отличительных черт сигналов, возникающих при данном виде дефекта.

На основе обработки множества однотипных сигналов получены их скейлограммы. Для приведенного выше сигнала обработка выполнялась по второму каналу. Исходный сигнал и срез его скейлограммы при фиксированном, наиболее информативном масштабе приведены на Рис. 8.

Аналогичные срезы были получены для дефектов типа «шар – шар» и «две плоскости» [4, 5]. Для формирования эталона было проведено

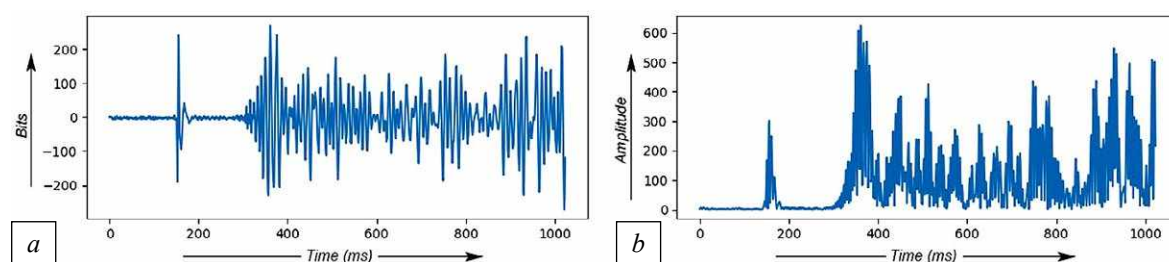


Рис. 8. Исходный сигнал (a) и временной срез его скейлограммы на фиксированном масштабе (b)

Fig. 8. The original signal (a) and the time slice of its scalegram on a fixed scale (b)

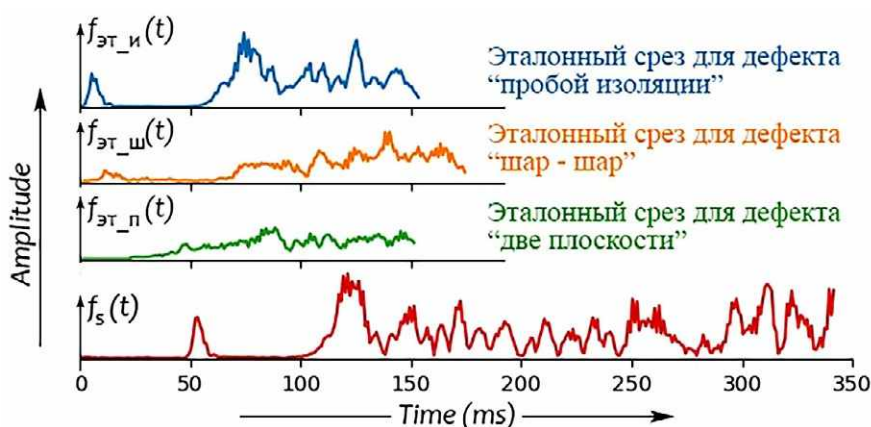


Рис. 9. Временной срез скейлограммы исследуемого сигнала $f_s(t)$ и эталонные срезы различных дефектов

Fig. 9. Time slice of the scalegram of the studied signal $f_s(t)$ and reference slices of various defects

усреднение максимальных значений полученного среза и выделение наиболее характерного участка. В итоге получены эталонные срезы скейлограммы для трех видов дефектов, представленные на Рис. 9.

С каждым из эталонов $f_{\text{эт}}(t)$ было выполнено сравнение срезов скейлограммы оригинальных сигналов $f_s(t)$ путем вычисления коэффициента K_s , характеризующего степень различия двух функций:

$$K_s(t, f_{\text{эт}}) = \frac{1}{T_{\text{эт}}} \int_0^{T_{\text{эт}}} (f_s(t+x) - f_{\text{эт}}(x))^2 dx \quad (3)$$

где $T_{\text{эт}}$ – длительность эталонного сигнала.

Для приведенного в работе сигнала, представляющего дефект «пробой изоляции», временное изменение данного коэффициента с применением трех вышеописанных эталонов приведено на Рис. 10.

Как видно из рисунка, в 45 мс эталонный образец $f_{\text{эт}_\text{и}}(t)$ максимально совпадает с проверяемым сигналом $f_s(t)$, что подтверждается низким локализованным значением коэффициента $K_s(t, f_{\text{эт}_\text{и}})$ (отличия минимальны).

Таким образом, применение непрерывного вейвлет-преобразования и сравнение срезов полученных скейлограмм с эталонными срезами позволяет различать сигналы, полученные от СЦАД, и диагностировать по ним различные виды дефектов силовых трансформаторов.

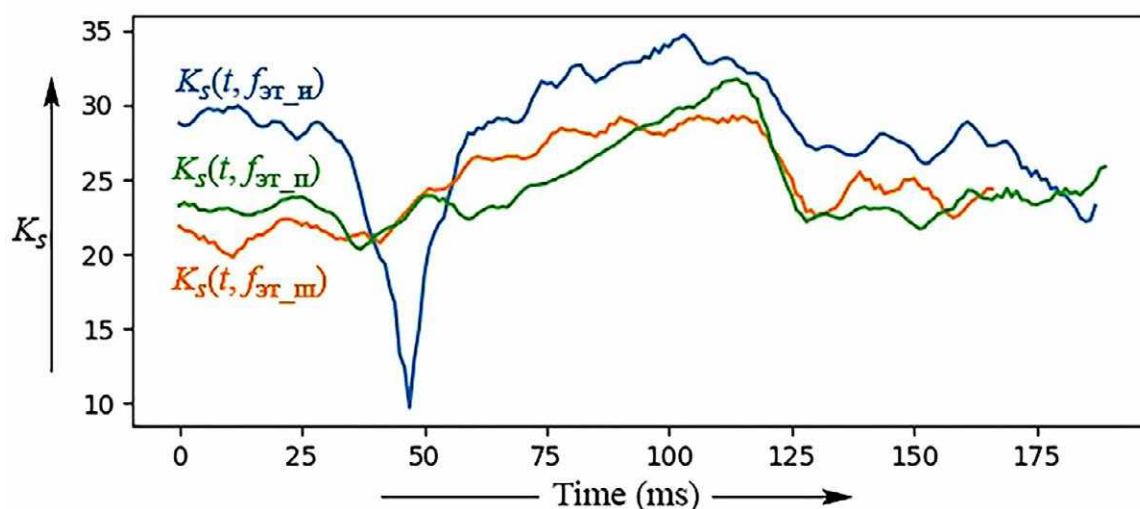


Рис. 10. Динамика изменения коэффициента K_s при сравнении исследуемого сигнала с тремя эталонными

Fig. 10. Dynamics of change in the coefficient K_s when comparing the studied signal with three reference ones

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведена информация по разработке методики обработки сигналов акустического контроля силовых трансформаторов с использованием вейвлет преобразования, позволяющей распознавать различные состояния изоляции путем сравнения сигналов с эталонными сигналами, полученными от имитатора дефектов.

ВЫВОДЫ

Использование вейвлет преобразования при обработке сигналов диагностирования, позволит сопоставлять сигналы, измеренные на силовом оборудовании, с сигналами, полученными с использованием имитатора дефектов, что позволит определять не только наличие, но и виды дефектов в силовом оборудовании.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00477, <https://rscf.ru/project/23-29-00477/>

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. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2004.
2. Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Сравнение акустических сигналов и видеоизображений высоковольтных разрядов в масле в задачах диагностирования силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2023. Т. 56, № 4. С. 121–134. EDN: OZHBWL
3. Волчанина М.А., Кузнецов А.А., Горлов А.В. Повышение достоверности диагностирования силовых трансформаторов в условиях сезонных изменений температуры // Электротехнические системы и комплексы. 2021. Т. 53, № 4. С. 33–38. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38
4. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 161–171. doi: 10.17816/transsyst202064161-171 EDN: DRLMYV

5. Горлов А.В., Волчанина М.А., Пономарев А.В., Кузнецов А.А. Исследование высоковольтных разрядов в масле на имитаторе с различным набором дефектов // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2023. Т. 9, № 1. С. 83–94. doi: 10.17816/transsyst20239183-94 EDN: WPBXRM
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2010.
7. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
8. Осипов Д.С., Долгих Н.Н., Дюба Е.А. Анализ несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей на основе вейвлет преобразования // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. № 3. С. 117–126. doi: 10.18822/byusu202303117-126
9. Осипов Д.С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения // *Омский научный вестник*. 2018. Т. 162, № 6. С. 71–75. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-71-75
10. Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С. Использование вейвлет-преобразований для локации сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 10. С. 18–26. doi: 10.14489/td.2017.10

REFERENCES

1. Ser'eznov AN, Stepanova LN, Murav'ev VV. *Diagnostics of transport objects using acoustic emission method*. Moscow: Mashinostroenie; 2004. (In Russ).
2. Kuznecov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Comparison of acoustic signals and video images of high-voltage discharges in oil in problems of power transformer diagnostics. *Izvestiya Transsiba*. 2023;4(56):121–134. (In Russ). EDN: OZHBWL
3. Volchanina MA, Kuznecov AA, Gorlov AV. Increasing the Reliability of Power Transformers Diagnosing under Seasonal Temperature Changes. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021;4(53):33–38. (In Russ). doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-33-38
4. Cheremisin VT, Kuznecov AA, Volchanina MA, Gorlov AV. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):161–171. (In Russ). doi: 10.17816/transsyst202064161-171 EDN: DRLMYV
5. Gorlov AV, Volchanina MA, Ponomarev AV, Kuznecov AA. Investigation of high-voltage discharge in oil on a simulator with a different set of defects. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(1):83–94. (In Russ). doi: 10.17816/transsyst20239183-94 EDN: WPBXRM
6. Dyakonov VP. *Wavelets. From Theory to Practice*. Moscow: SOLON-Press; 2010. (In Russ).
7. Dobeshi I. *Ten Lectures on Wavelets*. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika»; 2001. (In Russ).

8. Osipov DC, Dolgih NN, Dyuba EA. Analysis of non-sinusoidal non-stationary modes of electric networks based on the wavelet transformation. *Yugra State University Bulletin*. 2023;3:117–126. (In Russ). doi: 10.18822/byusu202303117-126
9. Osipov DC. Development of criterion for choosing optimal type of mother wavelet in problem of calculating active and reactive power at power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;6(162):71–75. (In Russ). doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-71-75
10. Stepanova LN, Ser'eznov AN, Kabanov SI, Ramazanov IS. Wavelet transform application for acoustic emission signals location. *Kontrol. Diagnostika*. 2017;10:18–26. (In Russ). doi: 10.14489/td.2017.10

Сведения об авторах:

Кузнецов Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsova.a.omgups@gmail.com

Пономарев Антон Витальевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402;
E-mail: antonyswork@gmail.com

Горлов Антон Вячеславович, аспирант;
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612;
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

Волчанина Мария Андреевна, кандидат технических наук, инженер;
eLibrary SPIN: 2130-4637;
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

Information about the authors:

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

Anton V. Ponomarev, Candidate of Technical Science, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402
E-mail: antonyswork@gmail.com

Anton V. Gorlov, Postgraduate student;
eLibrary SPIN: 8845-5070; ORCID: 0000-0002-8413-6612
E-mail: anton.gorlov@mail.ru

Maria A. Volchanina, Candidate of Technical Science, engineer;
eLibrary SPIN: 2130-4637;
E-mail: kuznetcova994@gmail.com

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst636104>

© **Е.И. Баканова, В.Л. Незевак, О.А. Сидоров**

Омский государственный университет путей сообщения

(Омск, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. Повышение эффективности функционирования систем тягового электроснабжения переменного тока. Решение задач по апробации технических и технологических решений на основе имитационного моделирования режимов работы систем тягового электроснабжения переменного тока.

Материалы и методы. Решение задач выполняется на основе разработанной имитационной модели, позволяющей выполнить апробацию алгоритмов регулирования режимов работы устройств накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения. Поставленные задачи решаются на основе следующих методов: системный метод, аналитический метод, метод статистического моделирования.

Результаты. На основании предложенной в статье имитационной модели выполнена апробация алгоритма регулирования устройства накопления электроэнергии. Результаты моделирования получены для условий регулирования активной мощности с помощью устройства накопления электроэнергии по уровню напряжения в контактной сети и проиллюстрированы расчетными осциллограммами токов и напряжений, их эффективными значениями для режимов заряда и разряда.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при сравнительной оценке эффективности способов регулирования устройствами накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения; переменный ток; автоматическое регулирование; система накопления электроэнергии; тяговая подстанция; линейное устройство контактной сети.

Как цитировать:

Баканова Е.И., Незевак В.Л., Сидоров О.А. Моделирование режимов работы устройств накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 517–536. doi: 10.17816/transsyst636104

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **E.I. Bakanova, V.L. Nezevak, O.A. Sidorov**

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

SIMULATION OF OPERATING MODES OF ELECTRIC POWER STORAGE DEVICES IN AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Aim. Improving the efficiency of AC traction power supply systems. Solving challenges in testing technical and technological solutions using simulation modeling of their operating modes.

Methods and Materials. The research is based on a simulation model designed to test algorithms for regulating the operation of electric power storage devices within the traction power supply system. The tasks are solved using the following methods: system method, analytical method, and statistical modeling method.

Results. The proposed simulation model enabled the testing of an algorithm regulating an electric power storage device. The simulation provided results for active power regulation using the voltage levels in the contact network. The results included calculated oscillograms and voltages, along with their effective values for both charge and discharge modes.

Conclusion. The results obtained can be used to compare the effectiveness of different methods for regulating electric power storage devices in AC traction power supply systems.

Keywords: traction power supply system; alternating current; automatic regulation; power storage system; traction substation; linear device of the contact network.

To cite this article:

Bakanova EI, Nezevak VL, Sidorov OA. Modeling of operating modes of electric power storage devices in AC traction power supply systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):517–536. doi: 10.17816/transsyst636104

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электрификация железных дорог преимущественно выполняется по системе тягового электроснабжения (СТЭ) переменного тока напряжением 25 и 2×25 кВ, с более высокими технико-экономическими показателями, в частности, по критерию обеспечения пропускной и провозной способности по сравнению с системами тягового электроснабжения постоянного тока [1]. Изменение условий пропуска поездов, параметров графика движения поездов, применение новых технологий при организации движения (виртуальная автосцепка), рост объемов перевозок, как правило, приводят к достижению предельных уровней нагрузочной способности СТЭ [2]. Одним из примеров, обуславливающих необходимость усиления систем тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 и 2×25 кВ, являются работы, связанные с развитием Восточного полигона железных дорог России, призванные обеспечить рост пропускной и провозной способности [3].

Одними из основных проблем при эксплуатации СТЭ переменного тока напряжением 25 и 2×25 кВ является снижение уровня напряжения, перегрузка силового оборудования тяговых подстанций и нагрев проводов и тросов контактной подвески, обусловленные ростом тяговых нагрузок. Кроме указанных проблем, обостряется необходимость решения задач по поддержанию качества электроэнергии, ухудшение которого обусловлено несимметричной и несинусоидальной тяговой нагрузкой [4]. В данных условиях развития СТЭ железнодорожного транспорта требуются решения, позволяющие обеспечить, с одной стороны, приемлемый уровень нагрузочных показателей, с другой стороны, нахождение в нормативном диапазоне показателей качества электроэнергии, в том числе несимметрии и несинусоидальности, а также уровня энергоэффективности [5].

Мероприятия по реконструкции и модернизации систем тягового электроснабжения подразделяются на группы, связанные с увеличением мощности силового оборудования и сечения проводов и тросов контактной подвески, сооружением дополнительных линейных устройств контактной сети, а также применением специальных установок, к которым относятся устройства компенсации реактивной мощности (продольного и поперечного типа), фильтрокомпенсирующие и вольтодобавочные (в том числе бустерные) устройства, системы регулирования режимов питания межподстанционных зон

путем изменения схем питания и секционирования контактной сети и др. [6, 7].

Применение устройств указанных групп позволяет обеспечить снижение потерь напряжения, мощности и электроэнергии в контактной сети, нагрева активной части силового оборудования, проводов и тросов контактной подвески, фидерных и отсасывающих линий, компенсацию реактивной мощности, снижение коэффициента несимметрии и несинусоидальности и др.

Одним из направлений решения вопросов повышения эффективности работы СТЭ переменного тока является применение активных постов секционирования контактной сети, питание которых может осуществляться с помощью специальных линий электропередач от тяговых подстанций или с помощью других источников мощности, в том числе систем накопления электроэнергии (СНЭЭ). Указанное техническое направление направлено на стабилизацию напряжения для обеспечения пропускной и провозной способности и, одновременно с этим, позволяет решать задачи по снижению уровня несимметрии и несинусоидальности, сглаживанию графика тяговой нагрузки в границах межподстанционных зон в условиях рекуперации энергии электроподвижным составом (ЭПС) [8, 9].

Перспективные виды СНЭЭ, которые могут рассматриваться в качестве одного из вариантов стационарного применения в СТЭ, содержат один или два накопителя электроэнергии (гибридные системы). Наибольшее распространение в гибридных системах получили электрохимические, электрические или электромеханические типы [10, 11]. В настоящее время для стационарного использования рассматриваются литий-ионные аккумуляторы различных модификаций, суперконденсаторы и кинетические накопители (маховики) [13–14]. Применение гибридных СНЭЭ обусловлено спецификой тяговой нагрузки, выражающейся в ее значительной неравномерности, несимметрии и несинусоидальности [15].

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СНЭЭ

Основными направлениями применения СНЭЭ в СТЭ переменного тока являются следующие:

- стабилизация напряжения в точке присоединения к СТЭ;
- выравнивание графика нагрузки тяговых подстанций;
- резервирование электроснабжения электроподвижного состава;

- регулирование активной и реактивной мощности в границах межподстанционных зон;
- снижение несимметрии нагрузки силовых трансформаторов.

Для решения задачи стабилизации напряжения на посту секционирования (PS) предлагается рассматривать размещение СНЭЭ (ESS) с подключением к шинам PS. Регулирование напряжения в контактной сети выполняется путем изменения режимов работы ESS на основе измерения напряжения с помощью трансформаторов напряжения TV (Рис. 1а).

Питание межподстанционной зоны осуществляется от тяговых подстанций (SS1 и SS2), на которых расположены трехфазные силовые трансформаторы (T1 и T2). СНЭЭ включает в себя накопитель электроэнергии (EES), низковольтный и высоковольтный фильтры (Z), преобразователь постоянно-переменного напряжения (DC/AC) и преобразовательный трансформатор. Эффективность регулирования напряжения зависит от мощности и энергоемкости ESS, обеспечивающих компенсацию падения напряжения в интервалах заданной продолжительности, работы преобразователей. Указанный вариант размещения СНЭЭ позволяет обеспечить регулирование напряжения в контактной сети при нахождении ЭПС как в тяговом режиме, так и при осуществлении рекуперативного торможения.

Решение задачи выравнивания графика нагрузки с помощью СНЭЭ может рассматриваться для вариантов их подключения к тяговым подстанциям или линейным устройствам контактной сети. При расположении на последних регулирование дополнительно может выполняться по уровню напряжения (Рис. 1б). Выравнивание нагрузки тяговых подстанций при регулировании СНЭЭ предполагает передачу данных в режиме реального времени от трансформаторов тока (ТА) подстанций к месту размещения СНЭЭ. Указанный канал регулирования является основным и определяет управление режимами работы СНЭЭ. Дополнительный канал регулирования реализуется на основе данных об уровне напряжения на шинах линейного устройства.

Необходимость резервирования электроснабжения определяется на основе сложившихся режимов работы СТЭ и надежности систем внешнего электроснабжения. При решении указанной задачи СНЭЭ присоединяются к шинам напряжения 27,5 кВ подстанций. В данном случае для присоединения СНЭЭ используются трехфазные преобразовательные

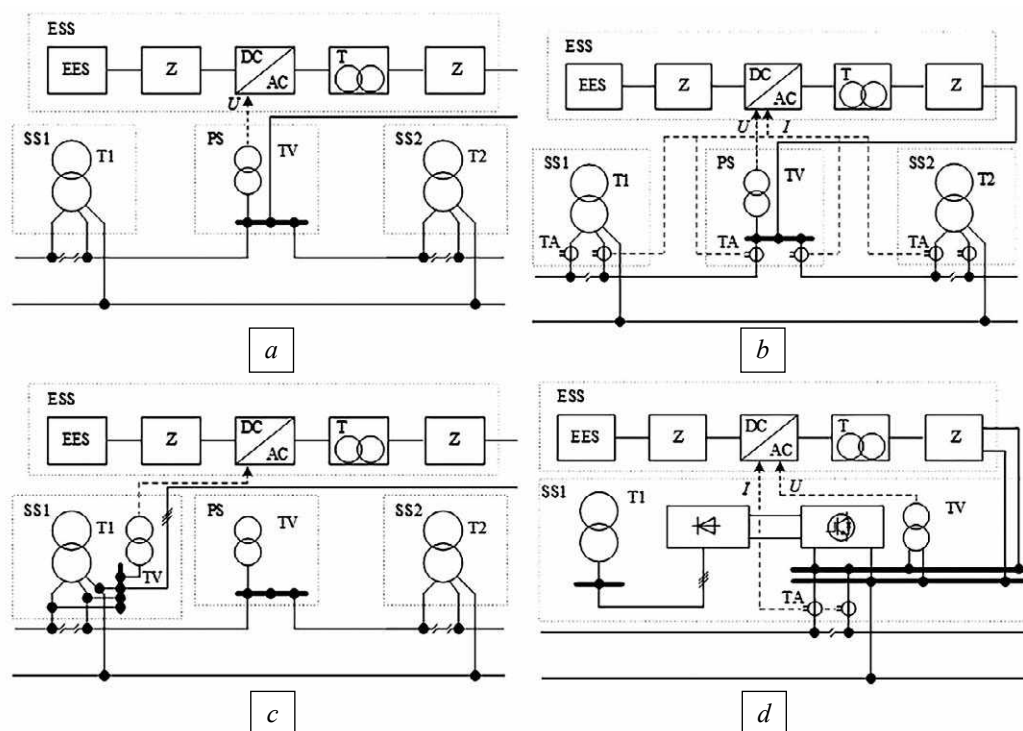


Рис. 1. Варианты размещения СНЭЭ для решения задач повышения эффективности работы СТЭ переменного тока

Fig. 1. SNAP placement options for solving problems of increasing the efficiency of AC STE

трансформаторы T1 и T2 (Рис. 1с) соответствующего класса напряжения переменного тока для питания нагрузки собственных нужд и нагрузки тяговых и нетяговых потребителей.

Для повышения качества электроэнергии и энергоэффективности на тяговых подстанциях могут рассматриваться схемы подключения, которые позволяют решить задачи снижения уровня несимметрии нагрузки, уравнивающих токов, повышения качества электроэнергии на шинах нетяговых потребителей и обеспечить регулирование напряжения за счет применения управляемых преобразователей и использования СНЭЭ путем их присоединения к шинам переменного тока, как показано на Рис. 1d. Исходя из функциональности СНЭЭ и вариантов их размещения могут прорабатываться различные алгоритмы регулирования режимов их работы.

В статье рассматриваются задачи формирования имитационной модели СТЭ переменного тока, содержащей СНЭЭ, размещенную на линейном устройстве (посту секционирования контактной сети)

и моделирования режимов работы СНЭЭ с помощью различных алгоритмов регулирования. На участках эксплуатации ЭПС с коллекторными тяговыми электродвигателями в спектре высших гармоник тока преобладает третья, пятая и седьмая гармоники, что обусловлено применением двухполупериодных схем выпрямления. Удельный вес гармонических составляющих возрастает при применении рекуперативного торможения. В настоящее время указанный электроподвижной состав составляет большую часть эксплуатирующегося парка электроподвижного состава, а решение задач стабилизации напряжения в контактной сети и снижения несинусоидальности связано с использованием регулируемых средств компенсации реактивной мощности, содержащих пассивные фильтры. В перспективе, сокращение доли ЭПС, использующих коллекторные тяговые двигатели, за счет расширения парка с асинхронным тяговым приводом будет способствовать снижению эффективности работы средств компенсации реактивной мощности и обуславливает поиск других решений, например, применение СНЭЭ.

При построении имитационной модели приняты следующие допущения, которые не оказывают существенного влияния на результаты моделирования. При регулировании напряжения на посту секционирования переменная тяговая нагрузка приводит к изменению уровня напряжения, который принят в качестве управляющей переменной. На первом этапе моделирования принято допущение о том, что нагрузка электроподвижного состава является переменной, но статичной. Принятие данного допущения не позволяет оценить динамику уровня потерь электроэнергии в тяговой сети при передвижении ЭПС, однако, позволяет оценить эффективность регулирования при переменной тяговой нагрузке. В качестве допущения принято, что напряжение вторичной обмотки силовых трансформаторов находится на постоянном уровне и не зависит от режимов работы внешнего электроснабжения, что позволяет на первом этапе упростить модель и использовать источник напряжения с неизменным уровнем напряжения. Сопротивления участков тяговой сети заданы в виде сопротивлений активно-индуктивного характера. Для моделирования принят однопутный участок, позволяющий упростить схему питания и секционирования контактной сети. Нагрузка электроподвижного состава задана в виде источника тока, содержащего высшие гармонические составляющие. Для регулирования режимов используется модуль напряжения и коэффициент нелинейных искажений тока тяговой нагрузки.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Регулирование напряжения в СТЭ постоянного и переменного тока основано на использовании устройств, позволяющих изменять параметры тяговых подстанций и сетей, в частности, мощность силового оборудования, коэффициент трансформации силовых и преобразовательных трансформаторов, реактивную проводимость тяговой сети и др. Регулирование СНЭЭ осуществляется с помощью различных алгоритмов, зависящих от решаемых задач и связанных с нагрузочными показателями СТЭ (уровень напряжения, нагрев, перегрузка и др.) или другими показателями эффективности (уровни реактивной мощности в границах межподстанционной зоны, уравнильных токов и др.).

При размещении СНЭЭ на посту секционирования контактной сети регулирование выполняется по уровням напряжения на шинах поста и гармоническому искажению тока. Для моделирования режимов работы СНЭЭ при решении задачи по стабилизации напряжения принята следующая структурная схема межподстанционной зоны (Рис. 2). Искжение тока регистрируется по одному из трех каналов и вместе с данными измерений уровня напряжения передается на систему автоматического регулирования (САР). Регулирование режимов СНЭЭ осуществляется на основе указанных выше данных измерений. Опорное напряжение для САР корректируется в зависимости от уровня напряжения в режиме холостого хода смежных тяговых подстанций и определяется по отсутствию гармонического искажения или путем передачи данных на пост секционирования аналогично передаче данных о гармоническом искажении тока.

Функции тока и напряжения являются периодическими и, в общем случае, несинусоидальными, которые можно представлять в виде ряда Фурье:

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega t), \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad (2)$$

B_k – амплитудное значение k -й гармоники, описываемой с помощью функции синуса:

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt; \quad (3)$$

C_k – амплитудное значение k -й гармоники, описываемой с помощью функции косинуса:

$$C_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt; \quad (4)$$

T – период времени; ω – угловая частота.

Представление функций тока и напряжения в виде функций, симметричных относительно оси или начала координат, позволяет упростить вид функции (1) и рассматривать искажения для соответствующей формы представления.

Коэффициент искажения тягового тока ЭПС определяется по выражению:

$$k_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (5)$$

где I_n – действующее значение n -й гармоники тока, А; I_1 – действующее значение тока основной частоты (50 Гц), А.

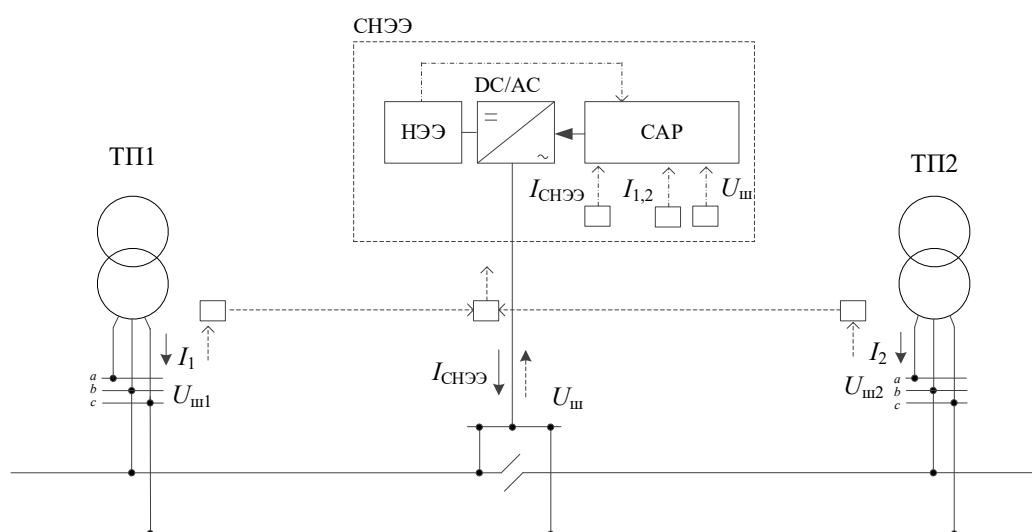


Рис. 2. Структурная схема межподстанционной зоны с системой накопления электроэнергии

Fig. 2. Block diagram of an inter-substation zone with an electric power storage system

Коэффициент n -й гармоники тока определяется по формуле:

$$k_{In} = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100. \quad (6)$$

Для определения искажений тока используются полное гармоническое искажение (total harmonic distortion или THD) и отдельное гармоническое искажение (individual harmonic distortion или IHD), определяемые по выражениям (5) и (6) соответственно, содержащиеся в виде отдельных функций в Matlab.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработанная в соответствии с представленной структурной схемой межподстанционной зоны СТЭ переменного тока (Рис. 2) в программном комплексе Matlab модель приведена на Рис. 3. В модели реализован режим двустороннего узлового питания межподстанционной зоны. Элементы СТЭ в модели представлены в виде активных и индуктивных элементов. Тяговая нагрузка двух единиц ЭПС и СНЭЭ представлена в виде регулируемых источников тока со случайно изменяемой нагрузкой.

В приведенной модели СТЭ элементы (силовое оборудование тяговой подстанции, секции контактной и рельсовой сети) представлены в виде нагрузки активно-индуктивного характера. Нагрузка ЭПС и СНЭЭ задана с помощью регулируемых источников переменного тока.

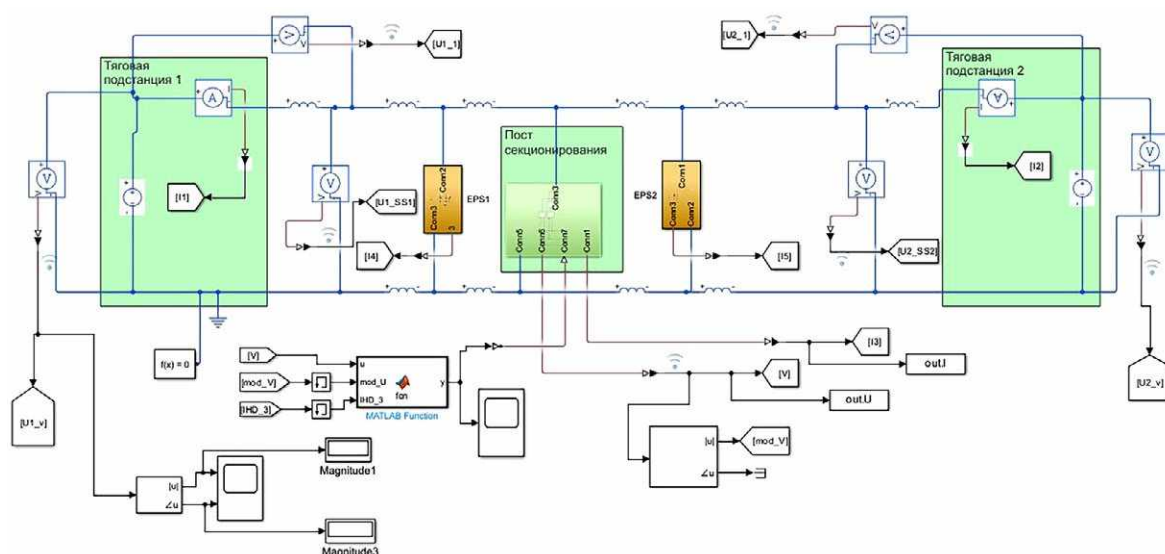


Рис. 3. Имитационная модель межподстанционной зоны

Fig. 3. Simulation model of the substation zone

Управление режимами работы СНЭЭ выполняется с учетом ограничений со стороны степени заряженности (SoC), глубины разряда (DoD), температуры (t), количества циклов заряд-разряд (n) и уровня напряжения и нагрузки НЭЭ ($U_{\text{вых}}$ и $I_{\text{вых}}$). Учет указанных данных позволяет прогнозировать уровень остаточной энергоемкости с учетом деградации в условиях эксплуатации. В общем случае регулирование выполняется в соответствии с функциональной схемой, приведенной на Рис. 4. На рассматриваемом этапе моделирования принято допущение о том, что указанные показатели работы не оказывают существенного влияния на режим работы и апробация алгоритма регулирования (Рис. 5) может быть проведена для нормального режима работы на основе измерения напряжения и гармонического искажения тока.

Алгоритм регулирования СНЭЭ обеспечивает стабилизацию напряжения на шинах поста секционирования при токах нагрузки СНЭЭ в границах допустимых рабочих диапазонов. Режим стабилизации напряжения переходит в режим стабилизации по току нагрузки при превышении номинальной мощности СНЭЭ. Режим заряда осуществляется при следующих условиях: повышение уровня напряжения в контактной сети выше опорного, снижение искажения тока тяговой нагрузки ниже заданного уровня.

В зависимости от значений тока гармонических составляющих $I_{i\text{IHD}}$, отклонений напряжения ΔU_i и тока гармонических составляющих $\Delta I_{i\text{IHD}}$

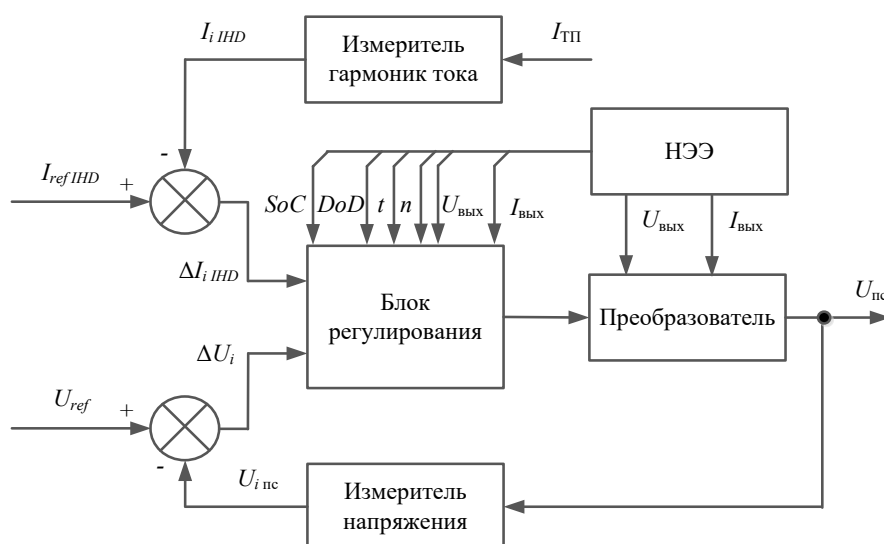


Рис. 4. Функциональная схема управления СНЭЭ

Fig. 4. Functional control scheme of the SNEE

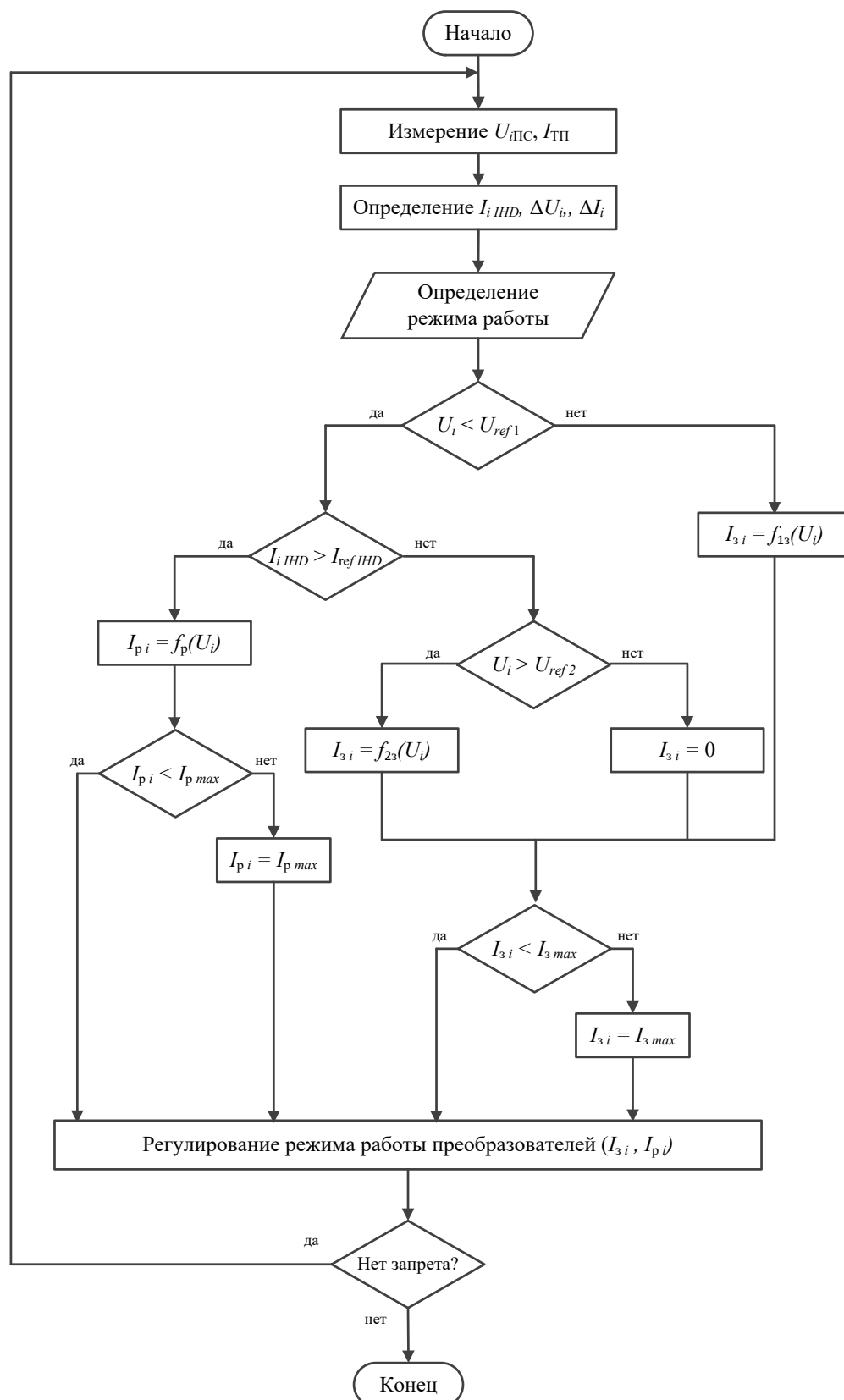


Рис. 5. Алгоритм регулирования СНЭЭ по уровню тяговой нагрузки

Fig. 5. The algorithm for regulating the SNEE by the level of traction load

САР управляющим воздействием на DC/AC преобразователь определяет его режим работы и мощность СНЭЭ.

Фрагменты результатов моделирования для режима разряда при управлении СНЭЭ по уровню напряжения и искажению тяговой нагрузки (3-й гармоники) в виде осциллограмм токов и напряжения приведены на Рис. 6–8.

Моделирование режимов работы СНЭЭ выполнено на основе регулирования активной мощности в режимах заряда и разряда. Ток, генерируемый СНЭЭ в режиме разряда, находится в противофазе с напряжением на посту секционирования.

Критериями для перехода в режим разряда СНЭЭ служат уровни напряжения на шинах поста секционирования и искажений тягового тока подстанции ТП1 на частоте 150 Гц. В данном случае работа СНЭЭ

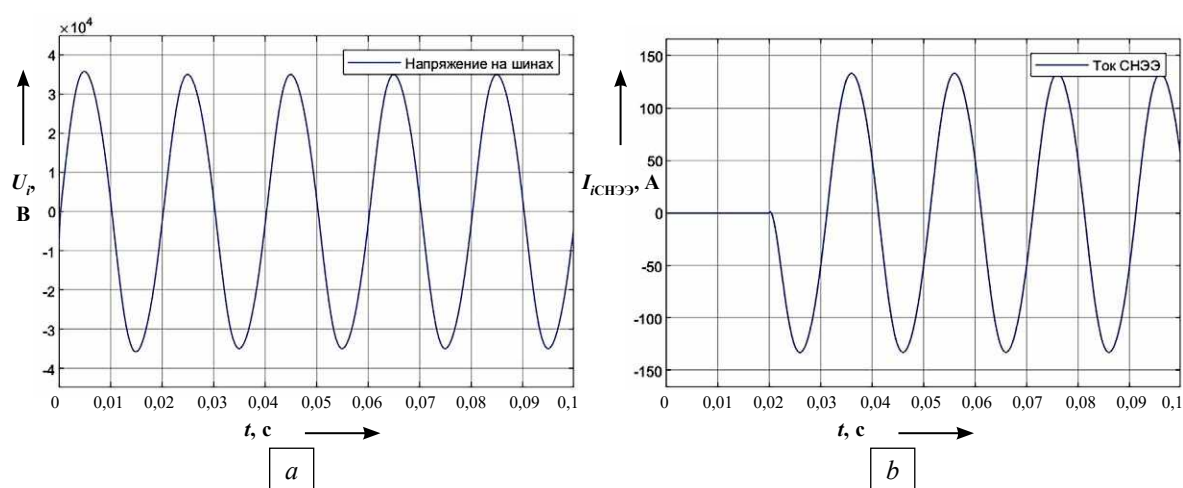


Рис. 6. Напряжение на шинах поста секционирования (a) ток СНЭЭ (b)

Fig. 6. Bus voltage of the partitioning post (a) SNE current (b)

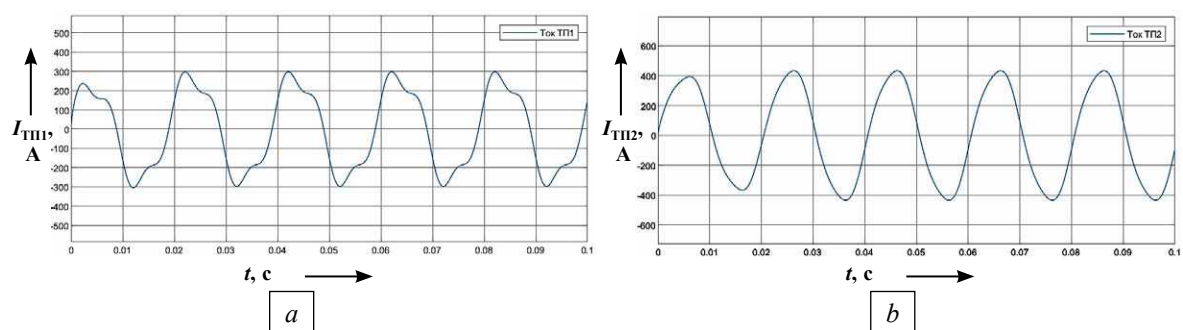


Рис. 7. Тяговая нагрузка подстанции: ТП1 (a), ТП2 (b)

Fig. 7. Traction load of the substation: TP1 (a), TP2 (b)

в режиме разряда направлена на компенсацию снижения напряжения на токоприемниках ЭПС.

Наличие искажений в тяговой нагрузке ЭПС приводит к соответствующему искажению тока нагрузки тяговых подстанций. Для полученных результатов наибольшее искажение соответствует наименьшему расстоянию питающей подстанции до источника искажений (Рис. 7). Искажение тока, потребляемого ЭПС, в модели выполняется с помощью регулируемого источника тока 3-й гармоники (для ЭПС1). Токковая нагрузка ЭПС2 в модели (Рис. 8) задана синусоидальной.

Графики напряжения (амплитудные значения) и измеренного искажения тока тяговой подстанции (для 3-й гармоники), полученные по результатам моделирования, приведены на Рис. 9. Указанные значения

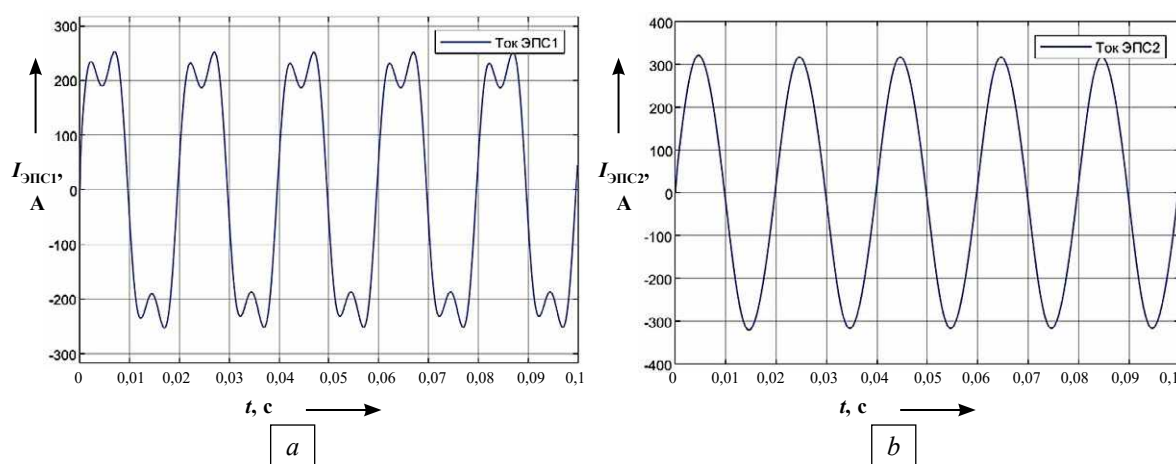


Рис. 8. Тяговая нагрузка ЭПС1 (а), ЭПС2 (б)

Fig. 8. Traction load PS1 (a), EPS2 (b)

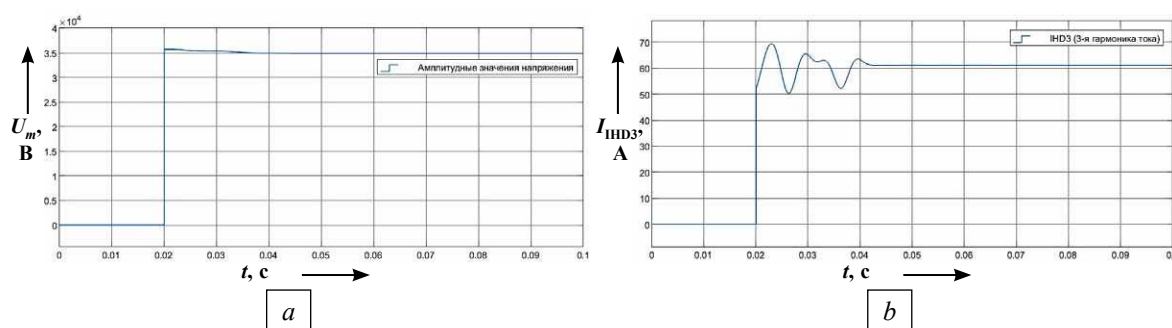


Рис. 9. График изменения напряжения (амплитудных значений) (а) и искажения тока (3-й гармоники) (б)

Fig. 9. Graph of voltage changes (amplitude values) (a) and current distortion (3rd harmonic) (b)

определяет режим работы и ток нагрузки СНЭЭ. Полученные результаты соответствуют режиму разряда СНЭЭ с целью компенсации падения напряжения в контактной сети, т.к. измеренное напряжение фиксируется ниже опорного, а ток тяговой подстанции содержит 3-ю гармонику, превышающая заданный уровень.

На основе представленной функциональной схемы управления СНЭЭ и алгоритма работы системы может выполняться моделирование работы СНЭЭ при изменении следующих показателей работы СТЭ переменного тока и ЭПС:

- уровня напряжения холостого хода на шинах тяговых подстанций;
- фазового сдвига между векторами напряжения смежных подстанций;
- изменения уровня и гармонического состава тяговой нагрузки;
- изменения уровня реактивной мощности.

Настройки системы автоматического регулирования СНЭЭ определяют уровень напряжения на шинах поста секционирования и позволяют для заданной тяговой нагрузки оценить эффективность регулирования работы СНЭЭ и сравнить полученные результаты с базовым (отсутствие СНЭЭ) вариантом. Регулирование по уровню напряжения в данном случае соответствует изменению активной мощности СНЭЭ, значение которой пропорционально отклонению напряжения от опорного уровня, что проиллюстрировано на графиках тока и напряжения для режима заряда (Рис. 10) и разряда (Рис. 11).

ВЫВОДЫ

Предложенная модель системы тягового электроснабжения переменного тока позволяет выполнить апробацию функциональных схем управления и алгоритмов регулирования режимов устройств накопления электроэнергии для различного набора параметров и вариантов формирования тяговой нагрузки, предназначенных для решения задач, связанных с повышением качества электроэнергии, энергетической эффективности и надежности. Для разработанной имитационной модели получены результаты расчетов при реализации алгоритма регулирования активной мощности системы накопления электроэнергии. Недостатком регулирования по уровню напряжения в точке присоединения устройства накопления является неэффективность регулирования при отклонении напряжения на шинах смежных тяговых подстанций от номинальных значений, что обуславливает необходимость разработки функциональных

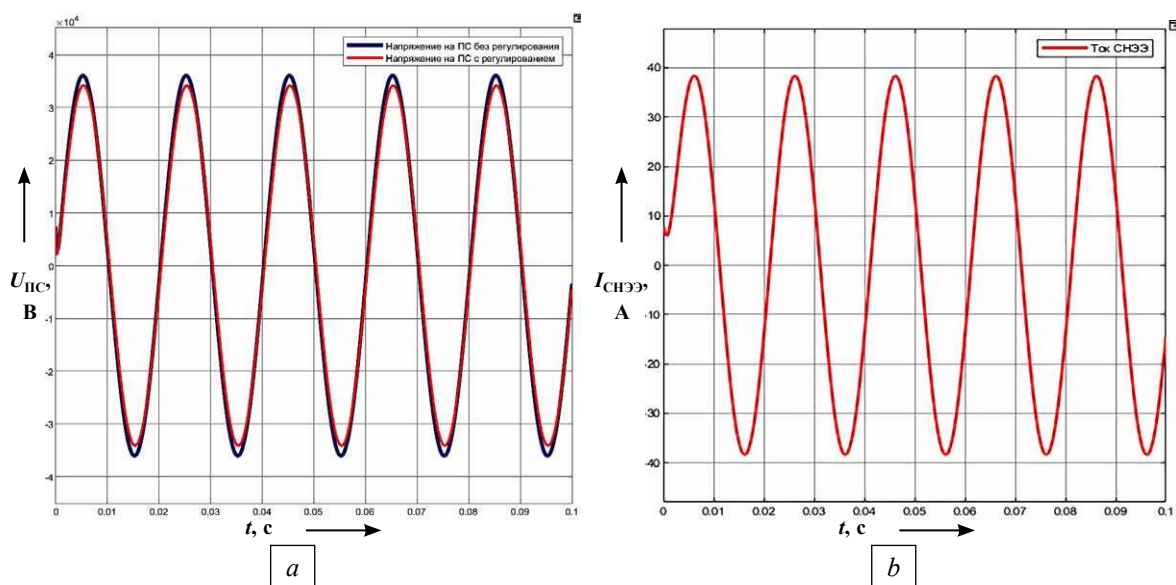


Рис. 10. График напряжения (а) на шинах поста секционирования и тока СНЭЭ (b) при регулировании активной мощности в режимах заряда

Fig. 10. Graph of voltage (a) on the busbars of the sectioning station and the SNEE current (b) when regulating active power in charge modes

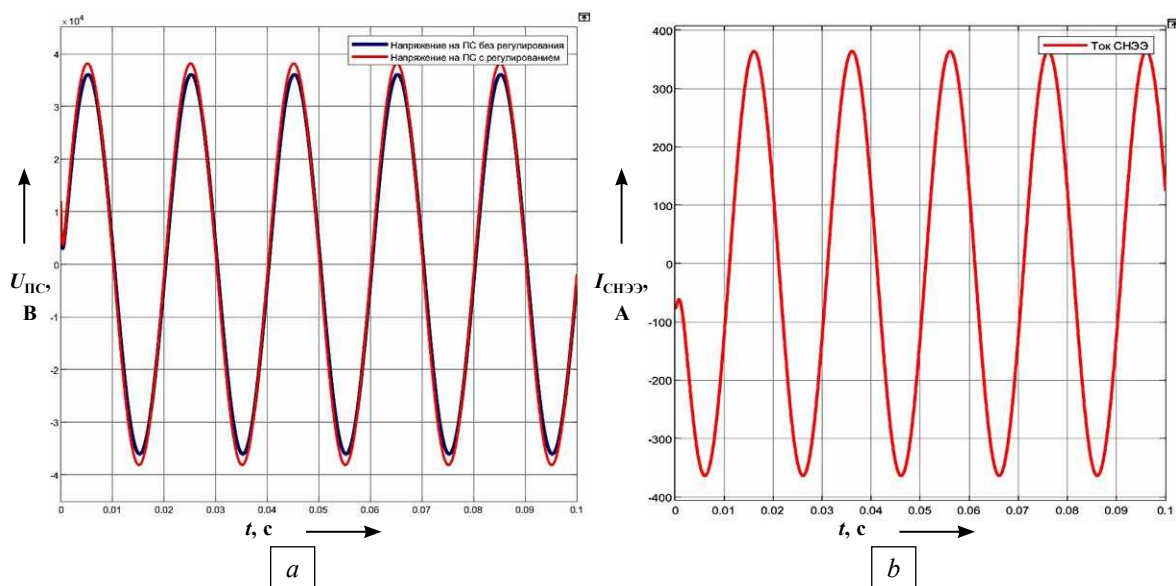


Рис. 11. График напряжения (а) на шинах поста секционирования и тока СНЭЭ (b) при регулировании активной мощности в режимах разряда

Fig. 11. Graph of voltage (a) on the busbars of the sectioning station and the SNEE current (b) when regulating active power in discharge modes

схем регулирования и алгоритмов, учитывающих уровень напряжения холостого хода на шинах тяговых подстанций.

Перспектива дальнейших исследований связана с разработкой способов регулирования напряжения, в том числе с учетом нагрузки и уровня реактивной мощности в границах межподстанционных зон для различных мест размещения устройств накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, рассмотрения схем размещения устройств накопления электроэнергии, преобразователей и различных алгоритмов регулирования. Одним из направлений дальнейших исследований является применение устройств накопления электроэнергии в перспективных системах тягового электроснабжения переменного тока для решения задач по повышению нагрузочной способности, качества электроэнергии и уровня энергетической эффективности.

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. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. М.: Интекст, 2002.
2. Крюков А.В., Черепанов А.В., Середкин Д.А. и др. Моделирование режимов системы тягового электроснабжения, использующей трансформаторные обмотки, соединенные в открытый треугольник // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 44–57. doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79)44-57
3. Заручейский А.В. Развитие тягового обеспечения Восточного полигона // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2017. № 3. С. 63–66. EDN: ZIZPHJ
4. Бадер М.П. Концепция и перспективы технического развития электроэнергетики железнодорожного транспорта // Электротехника. 2021. № 9. С. 34–40. EDN: PFOPOR
5. Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Саркенов С.С. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I типом профиля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3(55). С. 135–144. doi: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).135-144

6. Косарев Б.И., Сербиненко Д.В., Алексеенко М.В. Система тягового электроснабжения переменного тока с многофункциональными вольтодобавочными трансформаторами // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2013. № 1. С. 13–18. doi: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-67-73
7. Герман Л.А., Кишкурно К.В. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог // Электричество. 2014. № 9. С. 23–33. EDN: XXSQQN
8. Аржанников Б.А. Система управляемого тягового электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных и тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 134–137. EDN: OWWUCJ
9. Шевлюгин М.В., Голицына А.Е., Белов М.Н. и др. Применение накопителей энергии для усиления централизованного питания участка метрополитена в рамках одной межподстанционной зоны // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 1. С. 93–98. EDN: NLRDPE
10. Евстафьев А.М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. № 3. С. 27–38. EDN: YNUHGH
11. Буйносов А.П., Дурандин М.Г., Тутынин О.И. Анализ применения гибридного источника питания в системе тягового электропривода электропоезда // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 3(99). С. 12–18. EDN: GNKANH
12. Патент на полезную модель РФ № 137433 / 10.02.2014 Деньщиков К.К., Жук А.З., Голиков М.В. и др. Суперконденсаторное устройство электропитания оперативных токов тяговых подстанций. EDN: TYGFBM
13. Ярославцев М.В., Талипов О.М., Кислов А.П. [и др.] Определение параметров накопителя энергии Для повышения протяженности секций контактной сети городского электрического транспорта // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. 2023. № 1.2023. Р. 357–368. EDN: UFFPJG doi: 10.48081/jmuc8955
14. Варакин А.И., Варакин И.Н., Менухов В.В. и др. Буферные энергетические устройства в составе систем тягового электроснабжения на городском и железнодорожном электротранспорте // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 2. С. 26–29. EDN: IAMASV
15. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Финоченко А.В. Анализ применения современных видов накопителей энергии для повышения технико-экономических характеристик системы тягового электроснабжения постоянного тока. В кн.: Сб. научн. тр. Межд. научн.-практ. конф. Том 2. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. С. 28–31. EDN: JEWMSK

REFERENCES

1. Kotel'nikov AV. *Railway Electrification: Global Trends and Prospects*. Moscow: Intekst; 2002. (In Russ.)

2. Kryukov AV, Cherepanov AV, Seredkin DA, et al. Modelling of traction power supply systems modes at the movement of high-speed trains. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling.* 2023;3(79):44–57. (In Russ.) doi: 10.26731/1813-9108.2023.3(79)44-57
3. Zarucheskij AV. Razvitie tyagovogo obespecheniya Vostochnogo poligona. *Byulleten' Ob`edinennogo uchenogo soveta OAO RZhd.* 2017;3:63–66. EDN: ZIZPHJ
4. Bader MP. Concept and prospects of technical development of electric power engineering of railway transport. *Elektrotehnika.* 2021;9:34–40. (In Russ.) EDN: PFOPOR
5. Cheremisin VT, Nezevak VL, Sarkenov SS. Evaluation of the influence of the packet organization of traffic on the volume of electric power on traction on sections of direct current with the I type of profile. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling.* 2017;3(55):135–144. (In Russ.) doi: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).135-144
6. Kosarev BI, Serbinenko DV, Alekseenko MV. AC traction power supply system with multifunctional booster transformers. *Transport: science, equipment, management.* 2013;1:13–18. (In Russ.) doi: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-67-73
7. German LA, Kishkurno KV. Voltage regulation in the AC traction network of railways. *Elektrichestvo.* 2014;9:23–33. (In Russ.) EDN: XXSQQN
8. Arzhannikov BA. Controlled traction power supply system of direct current for passing high-speed and heavy-haul trains. *Transport of the Urals.* 2012;1(32):134–137. (In Russ.) EDN: OWWUCJ
9. Shevlyugin MV, Golicyna AE, Belov MN et al. Use of energy storage devices to enhance centralized power supply of a metro section within one inter-substation zone. *Energy Safety and Energy Economy.* 2023;1:93–98. EDN: NLRDPE
10. Evstaf`ev AM. Application of hybrid technologies in traction rolling stock. *Byulleten' rezul'tatov nauchny`x issledovanij.* 2018;3:27–38. (In Russ.) EDN: YNUHGH
11. Bujnosov AP, Durandin MG, Tuty`nin OI. Analysis of the application of a hybrid power source in the traction electric drive system of an electric train. *Vestnik transporta Povolzh`ya.* 2023;3(99):12–18. (In Russ.) EDN: GNKAHK
12. Patent RUS No. 137433 / 10.02.2014 Denshchikov K.K., Zhuk A.Z., Golikov M.V. et al. Supercapacitor power supply device for operational currents of traction substations. (In Russ.) EDN: TYGFBM
13. Yaroslavcev MV, Talipov OM, Kislov AP et al. Determination of parameters of energy storage device To increase the length of sections of contact network of urban electric transport. *Bulletin of Toraighyrov University. Energetics series.* 2023;1.2023:357–368. (In Russ.) doi: 10.48081/jmuc8955
14. Varakin AI, Varakin IN, Menuxov VV et al. Buffer energy devices as part of traction power supply systems in urban and railway electric transport. *E`lektronika i e`lektrooborudovanie transporta.* 2007;2:26–29. (In Russ.) EDN: IAMASV
15. By`kadorov AL, Zaruckaya TA, Finochenko AV. Analysis of the use of modern types of energy storage devices to improve the technical and economic characteristics

of continuous-current power supply systems. In: *Sb. nauchn. tr. Mezhd. nauchn.-prakt. konf.* Tom 2. – Rostov-na-Donu: Rostov State Transport University; 2021:2831. (In Russ.) EDN: JEWMSK

Сведения об авторах:

Баканова Елена Игоревна, ведущий специалист, аспирант;

eLibrary SPIN: 4075-5430

E-mail: elena.i.bakanova@mail.ru

Незевак Владислав Леонидович, доктор технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 8626-0883; ORCID: 0000-0002-1205-1994;

E-mail: ostu_ietpss_articles@mail.ru

Сидоров Олег Алексеевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 2364-5676;

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Information about the authors:

Elena I. Bakanova, Senior specialist, Postgraduate student;

eLibrary SPIN: 4075-5430

E-mail: elena.i.bakanova@mail.ru

Vladislav L. Nezevak, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8626-0883; ORCID: 0000-0002-1205-1994;

E-mail: ostu_ietpss_articles@mail.ru

Oleg A. Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 2364-5676;

E-mail: sidorovoa@omgups.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst637429>

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

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(Москва, Россия)

ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЗАМКНУТЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОЛЕЦ

Цель. сравнение магнито-силовых характеристик замкнутых ВТСП колец с одинарным и двойным разрезом.

Методы. Численный расчет выполнен методом конечных элементов в программном обеспечении Comsol Multiphysics.

Результаты. Получены профили вертикальной компоненты намагниченности для ВТСП колец с одинарным и двойным разрезом, намагниченных в градиентном магнитном поле и поле постоянного магнита. Построены зависимости нормированной силы левитации от числа слоев в обмотке для замкнутых и незамкнутой конфигураций. Наибольшая левитационная сила достигается, при использовании незамкнутой обмотки (она превосходит на 10% силу левитации замкнутой обмотки с одинарным разрезом и почти вдвое – с двойным).

Заключение. Разработаны численные модели процесса намагничивания замкнутых элементов на основе ВТСП лент второго поколения в градиентном поле постоянного магнита. Моделирование выполнено методом конечных элементов в терминах напряженности магнитного поля (Н-формализм) и магнитного векторного потенциала (А-формализм). Рассмотрены системы замкнутых ВТСП колец с одинарным и двойным разрезом. Верификация численных моделей проведена путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии.

Ключевые слова: сверхпроводящие кольца; композитные ВТСП-ленты; FEM-моделирование; А-формализм; Н-формализм.

Как цитировать:

Покровский С.В., Мартиросян И.В., Александров Д.А. Численное 3D моделирование магнитных систем на основе замкнутых сверхпроводящих колец // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 537–555. doi: 10.17816/transsyst637429

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

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

National research nuclear university MEPhI

(Moscow, Russia)

NUMERICAL 3D MODELING OF MAGNETIC SYSTEMS BASED ON CLOSED SUPERCONDUCTING RINGS

Aim. To compare the magnetic characteristics and levitation force of single-cut and double-cut closed HTS rings.

Methods. Numerical calculations were performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics software.

Results. The vertical magnetization profiles were obtained for single- and double-slit HTS rings magnetized under a gradient magnetic field and a permanent magnet's field. The normalized levitation force was analyzed based on the number of winding layers for both closed and nonclosed configurations. The nonclosed winding was found to generate the highest levitation force, namely 10% greater than that of a single-cut closed winding and nearly double that of a double-cut closed winding.

Conclusion. Numerical models were developed to simulate the magnetization process of closed-loop elements made from second-generation HTS tapes in the gradient field of a permanent magnet. The modeling was performed using the finite element method with both the magnetic field strength (H-formulation) and A-formulation (magnetic vector potential). Closed HTS ring systems with single and double cuts were analyzed. The models were verified by comparing the numerical results with experimental data obtained through scanning Hall magnetometry.

Keywords: superconducting rings; composite HTS tapes; FEM modeling; A-formulation; H-formulation.

To cite this article:

Pokrovskii SV, Martirosian IV, Aleksandrov DA. Numerical 3D modeling of magnetic systems based on closed superconducting rings. Modern Transportation Systems and Technologies. 2024;10(4):537–555. doi: 10.17816/transsyst637429

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря способности захватывать высокие магнитные поля, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют широкий спектр технических применений. Наиболее активно развивающиеся направления использования ВТСП элементов связаны с созданием магнитов захваченного поля (МЗП) [1]. В настоящее время МЗП внедряются в устройствах на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР), а также в сверхпроводящих моторах и генераторах [1–3]. Одним из перспективных конструкционных материалов для МЗП являются сверхпроводники на основе соединений $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (где RE-редкоземельный элемент, как правило Y или Gd) или сокращенно REBCO. Максимальные значения захваченного магнитного поля – 17,6 и 17,7 Тл, достигались с использованием объемного образца REBCO [1] и с использованием стопок ВТСП лент на основе REBCO [2], соответственно. В ранних конструкциях сверхпроводящих вращающихся машин намагниченные объемные образцы из высокотемпературной сверхпроводящей керамики применялись в составе конструкции ротора [3–5] или статора [6–7]. В конструкциях современных ВТСП генераторов часто используются беговые катушки с обмотками, изготовленными из ВТСП-лент второго поколения [8–9] и стопок лент [10–11]. Переход к конструкциям, содержащим элементы из ВТСП-композитов, стал возможен благодаря их преимуществам по сравнению с объемными образцами, таким как высокие критические характеристики, лучшие прочностные свойства, высокая термическая стабильность, легкость масштабирования устройств.

Одним из вариантов реализации магнитов с захваченным магнитным потоком на основе ВТСП-лент является замкнутая кольцевая ВТСП обмотка (также известная как кольцообразная или замкнутая катушка). Лента кольцообразной формы лишена несверхпроводящих переходов, являющихся источниками резистивных потерь, способных существенно повлиять на эффективность устройства. В этом случае намагничивание осуществляется методом магнитной накачки [4, 12]. Растущий интерес к ВТСП магнитам с замкнутым контуром [12–15] доказывает их потенциал для применения в различных устройствах, таких как портативные МРТ томографы [14] и вращающиеся машины [15]. В частности, в работе [16] сообщается о рекордном значении захваченного магнитного поля в сборке из 200 кольцевых лент – 4,6 Тл. Возрастающие перспективы разработки систем на основе замкнутых кольцевых ВТСП элементов обусловили интерес к поиску оптимальных конфигураций таких систем, а также

наиболее надежных и быстрых методов численного анализа применительно к расчету систем на основе ленточных ВТСП композитов [17–21].

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования МЗП на основе замкнутых сверхпроводящих колец с одним и двумя разрезами, проведено сравнение профилей захваченного магнитного поля для рассмотренных конфигураций замкнутых ВТСП колец, а также сравнение максимальной намагниченности систем с величиной захваченного поля незамкнутой ВТСП обмоткой для различного количества ВТСП слоев. Моделирование процессов намагничивания ВТСП систем выполняется методом конечных элементов с использованием термосвязанных А и Н формулировок нестационарных уравнений Максвелла. Верификация численных моделей проведена путем сравнения результатов расчета намагниченности замкнутого ВТСП кольца с одинарным разрезом с экспериментальным профилем захваченного магнитного поля, полученным с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии. На основе сравнения точности разработанных моделей, а также времени вычислений, сделан вывод об эффективности применения рассмотренных формулировок для выполнения численного анализа МЗП на основе ленточных ВТСП композитов.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

На Рис. 1 представлена принципиальная схема и основные параметры замкнутых ВТСП катушек с одним и двумя разрезами. Для получения замкнутого кольцевого элемента с одним разрезом (Рис. 1А) ВТСП лента разрезается вдоль по центральной линии, и центральные части разводятся в противоположные стороны. Для получения замкнутого ВТСП кольца с двойным разрезом центральная часть ВТСП ленты разрезается на три фрагмента, причем центральный фрагмент имеет ширину 6 мм, а ширина каждого бокового фрагмента составляет 3 мм. После чего соседние части разводятся в разные стороны, как показано на Рис. 1Б. Перечень основных геометрических параметров моделируемых ВТСП колец приведен в Табл. 1. Кольцевые ВТСП обмотки изготовлены из фрагментов 12 мм ВТСП ленты длины $L=53$ мм. Диаметр кольца составляет 20 мм. Толщина $h_{coil}=N \cdot h_{HTS}$ замкнутой кольцевой обмотки определяется количеством ВТСП лент N и толщиной единичной ВТСП ленты h_{HTS} . В рамках представленной работы количество N ВТСП слоев в сверхпроводящих кольцах варьируется от 1 до 10. Толщина h_{HTS} ВТСП лент REBCO производства С-Инновации, рассматриваемых в представленной работе, составляет ~ 100 мкм. Каждая

ВТСП лента представляет собой композитную структуру, содержащую слои подложки (70 мкм), ВТСП слой (3 мкм), слой серебра (5 мкм), а также двусторонне медное покрытие (10 мкм с каждой стороны). Согласно спецификации производителя, средний критический ток ВТСП ленты составляет 550 А в собственном поле при температуре кипения жидкого азота.

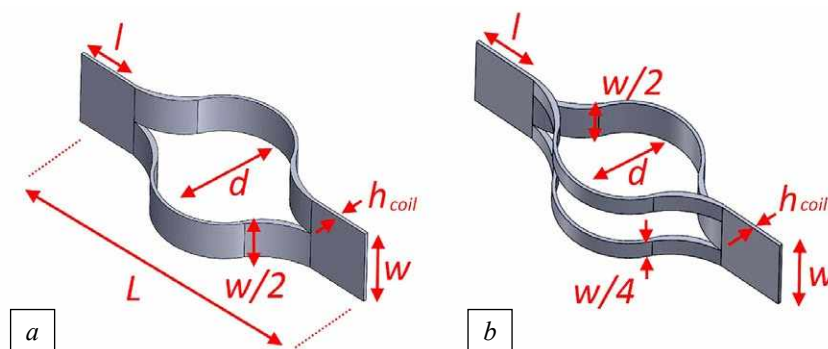


Рис. 1. Принципиальная схема замкнутых ВТСП колец. *a* – замкнутое ВТСП кольцо с одним разрезом, *b* – замкнутое ВТСП кольцо с двумя разрезами

Fig. 1. Schematic diagram of closed HTS rings. *a* – closed HTS ring with one cut, *b* – closed HTS ring with two cuts

Таблица 1. Основные геометрические параметры замкнутых ВТСП колец

Table 1. Main geometrical parameters of closed HTS rings

Параметр	Обозначение	Величина
Диаметр кольца, мм	d	20
Ширина ВТСП ленты, мм	w	12
Длина боковых граней, мм	l	10
Длина образца, мм	L	53

Намагничивание замкнутых ВТСП колец осуществляется постоянным цилиндрическим NdFeB магнитом марки N45 диаметра 40 мм высоты 10 мм. Остаточная индукция магнитного поля на поверхности постоянного магнита (ПМ) составляет 0,35 Тл. В процессе намагничивания ПМ приближается вдоль вертикальной оси (совпадает с осью ВТСП кольца) к предварительно охлажденному образцу с высоты 100 мм до высоты 1 мм к ближайшей поверхности кольца, после чего ПМ отводится обратно до высоты 100 мм. Процесс намагничивания продолжается в течение 30 с. Таким образом намагничивание образцов осуществляется в режиме охлаждения в нулевом поле (ZFC). Моделирование описанной системы

выполнялось с использованием метода конечных элементов в двух наиболее часто применяемых формулировках нестационарных уравнений Максвелла – А- и Н-формализмах. Далее приведено описание данных формулировок для решения электродинамической задачи о распределении токов в ВТСП.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. Н-ФОРМАЛИЗМ

Н-формулировка уравнений Максвелла является одним из наиболее распространённых методов численного анализа ВТСП систем [20]. Расчет процесса намагничивания замкнутых ВТСП колец выполняется методом конечных элементов с использованием общей формы дифференциальных уравнений в частных производных (*General form PDE*) пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. В среде Comsol общая форма PDE задается уравнением:

$$\mathbf{e}_a \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \times \Gamma = \mathbf{F}, \quad (1)$$

где во всем пространстве в качестве зависимой переменной $\mathbf{u}$ при моделировании выбирается напряженность магнитного поля $\mathbf{H}(x, y, z)$.

Параметры уравнения (1) подобраны таким образом, что выражение преобразуется в уравнение Фарадея:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{B}}{dt} = \nabla \times \mathbf{E} + \frac{d(\mu_0 \mu_r \mathbf{H})}{dt} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}$ – напряжённость электрического поля, $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля, $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, μ_r относительная магнитная проницаемость, которая принимается равной 1.

Компоненты тока $\mathbf{J}$ определяются на основе закона Ампера:

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} = \begin{cases} J_x = \frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz}; \\ J_y = \frac{-dH_z}{dx} + \frac{dH_x}{dz}; \\ J_z = \frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy}. \end{cases} \quad (3)$$

Нелинейная зависимость сопротивления от тока задается с помощью степенного закона для вольтамперной характеристики:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1}, \quad (4)$$

где E_c – критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J_c – критический ток, компоненты тока J вычисляются на основе закона Ампера (3), n – показатель степени, экспериментальная полевая зависимость для которого вводится в рамках модели в виде интерполяции.

В рамках модели Н-формализма каждая ВТСП лента включает, помимо сверхпроводящего слоя, подложку, а также слои меди и серебра, что соответствует производственной архитектуре лент. Ввиду отсутствия хоть сколько-нибудь весомого вклада в тепловые и электродинамические процессы в ВТСП ленте, наноразмерные слои композита при моделировании не учитываются. Электрический контакт между всеми слоями ВТСП композита принимается идеальным, а зависимости сопротивлений всех слоёв (кроме сверхпроводящего) от тока вводятся в виде интерполяции для каждого материала.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. А-ФОРМАЛИЗМ

Несмотря на то, что моделирование сверхпроводников в Н-формализме является наиболее широко используемым подходом, при расчете магнитных сверхпроводящих систем, активно применяются и другие методы. Одним из таких методов является моделирование ВТСП систем с использованием А-формализма [21]. Использование А-формализма в случае замкнутых ВТСП элементов, которые, как правило, наиболее часто встречаются в конструкциях ВТСП генераторов [22], может привести к сокращению времени расчета. Для проверки этого предположения разработана модель в терминах магнитного векторного потенциала A . В основе описания формализма заложена двухжидкостная модель, в рамках которой все свободные электроны сверхпроводящего домена разделены на два ансамбля – сверхпроводящие электроны с плотностью n_s и нормальные электроны с плотностью n_n . Соответственно, плотность тока также разделяется на две компоненты:

$$J = \sigma E + J_s, \quad (5)$$

где σE – ток нормальных электронов, J_s – ток куперовских пар. Вычисление J_s происходит на основе решения уравнений Максвелла для вектора напряженности электрического поля:

$$\mathbf{E} = \frac{-\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi, \quad (6)$$

где φ – электростатический потенциал, A – векторный потенциал магнитного поля.

Связь между напряженностью электрического поля и плотностью тока описывается степенным законом:

$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{\mathbf{J}}{J_c} \right)^n, \quad (7)$$

Для описания связи плотности тока и векторного потенциала используется приближение, предложенное А. Кэмпбеллом в работе [23] :

$$\mathbf{J} = J_c \tanh \left(\frac{-\partial A}{\partial t E_c} \right). \quad (8)$$

В рамках моделирования в терминах компонент магнитного векторного потенциала геометрические параметры ВТСП элементов также соответствуют реальной архитектуре композитных лент, однако, образец (ВТСП кольцо или стопка ВТСП колец) по аналогии с работой [17] рассматривается в виде гомогенизированного домена с эквивалентными характеристиками (инженерной плотностью тока, эффективной теплоемкостью и теплопроводностью).

В основе описания физики тепловых процессов лежит нестационарное уравнение теплопроводности в твердых телах:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + \rho C_p \mathbf{w} \nabla T, \quad (9)$$

где в качестве зависимой переменной выступает абсолютная температура T , C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, $\mathbf{w}$ – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические.

Расчет производится с учетом температурных зависимостей теплоемкостей и теплопроводностей всех слоев ВТСП композита, который определяется как объемный источник тепла, а локальное тепловыделение Q вычисляется в соответствии с выражением:

$$Q = E_n \cdot J_n, \quad (10)$$

где $E_n = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ – напряженность электрического поля,

а $J_n = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2}$ – плотность электрического тока. Распределения токов $\mathbf{J}$ и напряженностей электрического поля $\mathbf{E}$ в сверхпроводнике определяются условиями намагничивания и вычисляются при решении уравнений Н или А формулировки.

При моделировании азотного охлаждения ВТСП композитов рассматриваются два режима кипения хладагента – конвективный (или стационарный) и пузырьковый. Эти режимы характеризуются различными коэффициентами теплоотдачи. Для пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи рассчитывается как:

$$\alpha_{boil} = C_h q^{0.624} (\rho C_p k)^{0.117}, \quad (11)$$

где ρ – плотность, C_p – теплоемкость, k – теплопроводность жидкого азота, q – тепловой поток, C_h – коэффициент [24–25].

Коэффициент теплоотдачи для стационарного кипения жидкого азота определяется разностью температур ΔT на границе между стопкой лент и жидким азотом и рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{conv} = C_{conv} \cdot T^{\frac{1}{3}}, \quad (12)$$

где C_{conv} – коэффициент [24–25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Верификация численных моделей выполнена с использованием данных о распределении захваченного магнитного поля, полученных с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии для замкнутого ВТСП кольца с одинарным разрезом, при этом сканирование поверхности захваченного магнитного поля осуществлялось на высоте 1 мм от верхней поверхности образцов.

На Рис. 2 в качестве примера представлены экспериментальные и расчетные распределения z -компоненты индукции магнитного поля, захваченного стопкой из двух ВТСП колец при намагничивании в градиентном магнитном поле МП при температуре кипения жидкого азота (77.4 К). Хорошо видно, что результаты численного анализа в обеих А и Н

формулировках находятся в согласии с результатами экспериментальных исследований, притом анализ в терминах компонент магнитного поля демонстрирует более точное прогнозирование отрицательных областей зависимости.

С увеличением количества ВТСП лент в стопке замкнутых ВТСП катушек различие между результатами расчетов в двух рассматриваемых формулировках снижается. На Рис. 3 в качестве примера представлены экспериментальная и расчетная зависимости остаточной намагниченности для девяти замкнутых ВТСП колец с одинарным разрезом.

Следует отметить, что расчет системы с использованием А-формализма требует значительно меньших затрат вычислительных ресурсов и времени. Так, при расчете системы девяти ВТСП колец с одинаковой точностью расчетной сетки при использовании компьютера на базе процессора IntelCorei9 (G10 XE, 18 физических ядер, 128 Гб ОЗУ)

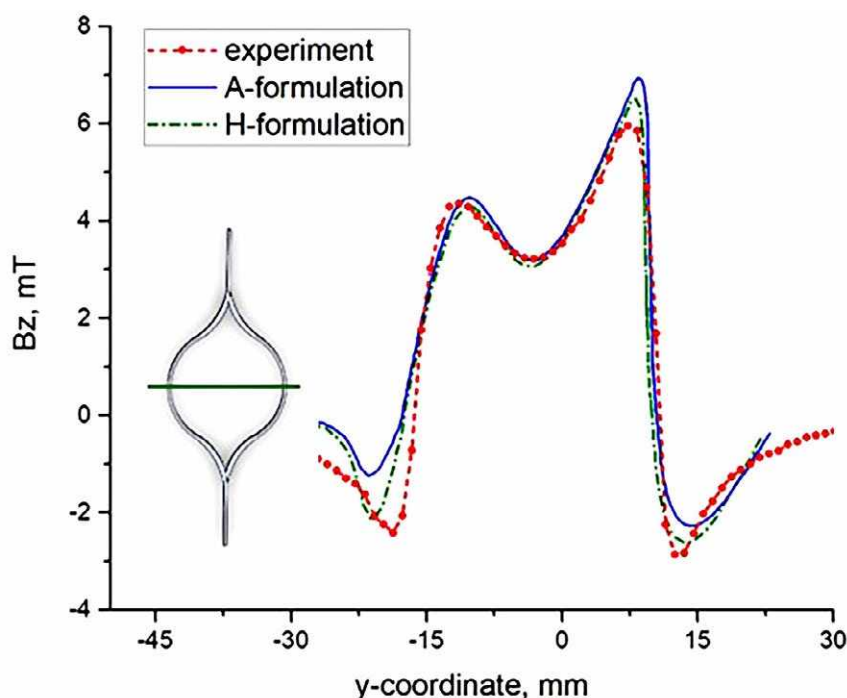


Рис. 2. Распределения остаточной намагниченности на высоте 1 мм от верхней поверхности двух замкнутых ВТСП колец при полном намагничивании в градиентном магнитном поле при температуре 77 К. На вставке показана линия над образцом, вдоль которой строилось распределение магнитного поля

Fig. 2. Distributions of residual magnetization at a height of 1 mm from the top surface of two closed HTS rings during full magnetization in a gradient magnetic field at a temperature of 77 K. The inset shows the line above the sample along which the magnetic field distribution was plotted

с дискретным графическим процессором Nvidia G Force GTX 3060 Ti (8 Гб) Н формулировке потребовалось 20 ч 39 мин, тогда как продолжительность вычислений с использованием А-формулировки составила 8 ч 19 мин.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что Н-формулировка нестационарных уравнений Максвелла в общем случае является более точной. Однако, при увеличении размера системы, когда на передний план выходят интегральные усредненные характеристики системы, в целях экономии вычислительных ресурсов и времени можно использовать формулировку в терминах компонент магнитного векторного потенциала без существенной потери в точности вычислений.

Для обеспечения наибольшей точности вычислений дальнейшие расчеты выполнялись с использованием формулировки в терминах компонент магнитного поля (Н-формализм), которая продемонстрировала наилучшее согласование с экспериментальными результатами для систем

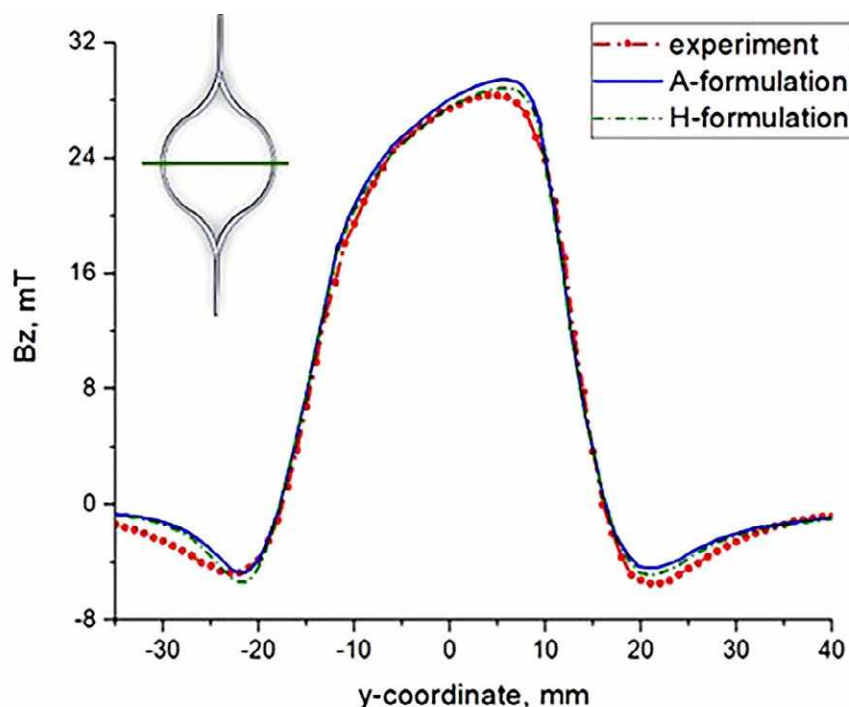


Рис. 3. Распределения остаточной намагниченности на высоте 1 мм от верхней поверхности девяти замкнутых ВТСП колец при намагничивании в градиентном магнитном поле при температуре 77 К. На вставке показана линия над образцом, вдоль которой строилось распределение магнитного поля

Fig. 3. Distributions of residual magnetization at a height of 1 mm from the top surface of nine closed HTS rings when magnetized in a gradient magnetic field at a temperature of 77 K. The inset shows the line above the sample along which the magnetic field distribution was plotted

с различным числом ВТСП лент. На втором шаге исследований было проведено сравнение магнитных характеристик замкнутых кольцевых ВТСП обмоток с одинарным и двойным разрезом. На Рис. 4 представлены профили остаточной намагниченности над поверхностью одиночных ВТСП колец с одним и двумя разрезами на высоте 2 мм от верхней поверхности. Как видно из представленных распределений, использование замкнутых ВТСП катушек с двойным разрезом позволяет получить более равномерное распределение магнитного поля над поверхностью обмотки.

Для оценки эффективности применения замкнутых ВТСП обмоток был выполнен анализ магнитных характеристик замкнутых ВТСП катушек с незамкнутой ВТСП обмоткой. Незамкнутая сверхпроводящая обмотка представляет собой ВТСП ленту с незакрепленными концами, намотанную на формер диаметра 20 мм, т.е. имеющую размер, эквивалентный рассмотренным конфигурациям замкнутых ВТСП колец. Анализ магнитных характеристик трех систем выполнялся путем сравнения максимальной силы магнито-левитационного взаимодействия обмоток с постоянным

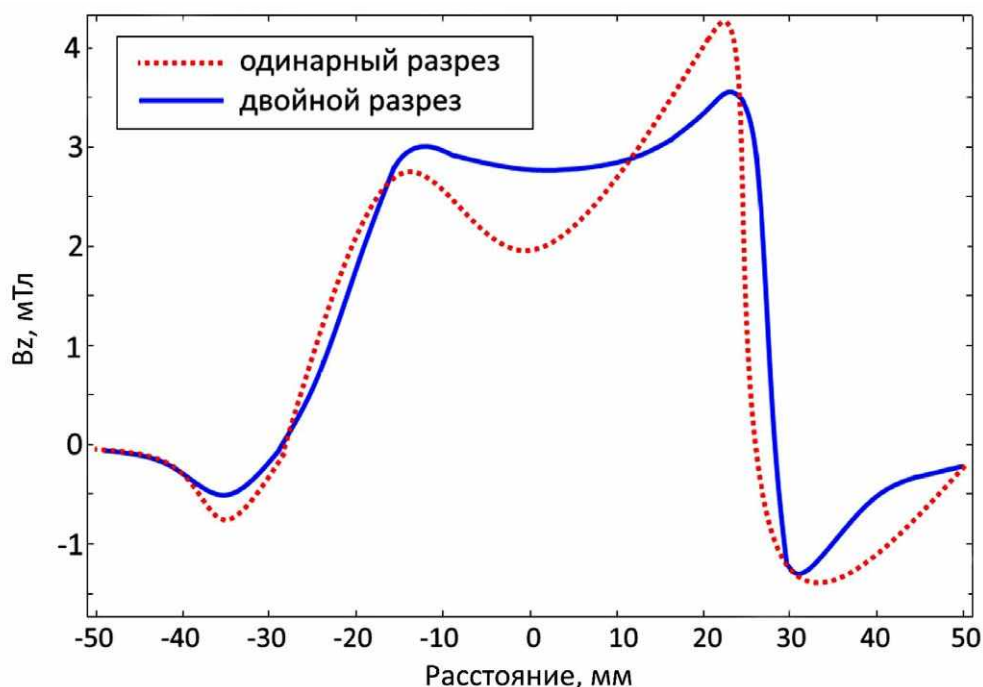


Рис. 4. Расчетное распределение остаточной намагниченности на высоте 1 мм от верхней поверхности замкнутых ВТСП колец при полном намагничивании в поле постоянного магнита при температуре 77 К

Fig. 4. Calculated distribution of residual magnetization at a height of 1 mm from the top surface of closed HTS rings at full magnetization in the field of a permanent magnet at a temperature of 77 K

NdFeB в процессе намагничивания. На Рис. 5 приведены нормированные зависимости максимальной силы левитации ВТСП образцов от количества слоев ВТСП ленты в обмотке при температуре 77,4 К.

Из представленной на Рис. 5 зависимости видно, что сила левитации при увеличении количества ВТСП слоев от 1 до 10 растет линейно для всех рассмотренных конфигураций системы. Замкнутое ВТСП кольцо с двойным разрезом демонстрирует лучшие показатели силы магнито-левитационного взаимодействия в сравнении с классическим замкнутым кольцом, что, вероятно, обусловлено различиями в профилях поля остаточной намагниченности. Наибольшая отталкивающая сила достигается при использовании незамкнутой обмотки, превосходя кольца с двойным разрезом более чем на 10% и почти вдвое – обмотку с одинарным разрезом.

Кроме того, как видно из большего угла наклона кривой, темпы роста силы левитации для замкнутой ВТСП обмотки с двойным разрезом являются наибольшими из трех рассмотренных случаев. В связи с этим для более точной оценки эффективности применения замкнутых ВТСП колец с двойным разрезом и незамкнутых ВТСП колец необходим расчет

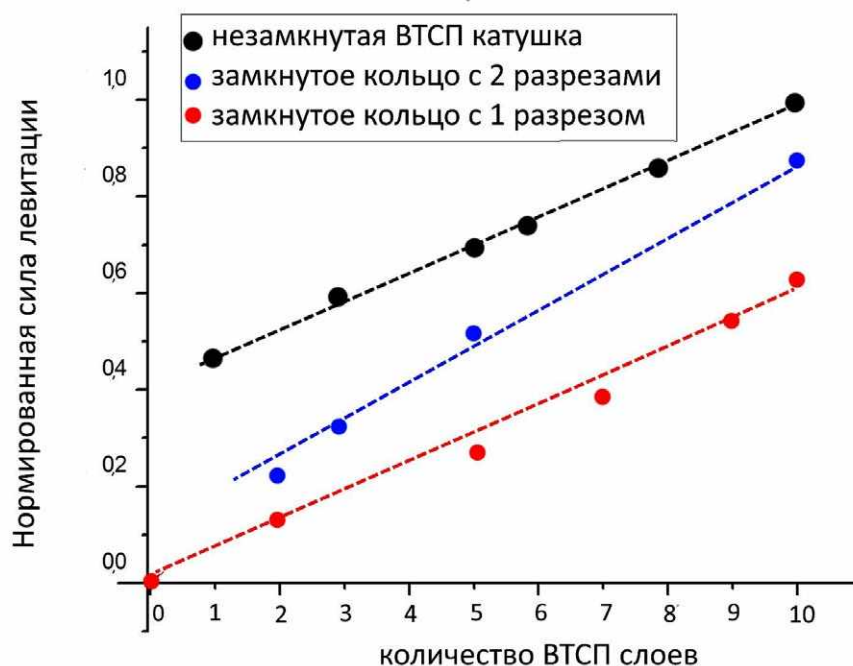


Рис. 5. Нормированные расчетные зависимости левитационной силы от числа колец в ВТСП обмотке

Fig. 5. Normalized calculated dependences of the levitation force on the number of rings in the HTS winding

системы с большим количеством ВТСП слоев. Тем не менее, разница всего лишь $\sim 10\%$ между этими конфигурациями свидетельствует о перспективности применения замкнутых ВТСП обмоток в магнитных системах.

Стоит также отметить, что важным преимуществом замкнутых ВТСП колец на практике является тот факт, что для конструирования катушки на их основе могут быть набраны фрагменты композитной ленты с наиболее однородным критическим током, тогда как незамкнутые обмотки неизбежно будут сформированы из длинномерных образцов. На практике критический ток фрагментов ВТСП ленты большой длины варьируется в пределах 15% , что приводит к росту тепловых потерь и потерь на перемагничивание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработаны численные модели процесса намагничивания замкнутых сверхпроводящих колец с одним и двумя разрезами во внешнем градиентном магнитном поле постоянного магнита. Моделирование процессов намагничивания ВТСП систем выполняется методом конечных элементов с использованием термосвязанных A и H формулировок нестационарных уравнений Максвелла. Верификация численных моделей проведена путем сравнения результатов расчета намагниченности замкнутого ВТСП кольца с экспериментальным профилем захваченного магнитного поля, полученным с использованием методов сканирующей холловской магнитометрии. Установлено, что наиболее точной является модель в терминах компонент магнитного поля, однако с увеличением размера сверхпроводящей системы обе рассмотренные формулировки демонстрируют практически одинаковую, высокую точность вычислений. Сравнение профилей захваченного магнитного поля проведено для рассмотренных конфигураций замкнутых ВТСП колец с одинарным и двойным разрезом, содержащих от 1 до 10 ВТСП слоев, выполнено сравнение максимальной намагниченности систем с величиной захваченного поля для незамкнутой ВТСП обмотки при различном количестве ВТСП слоев. Замкнутое ВТСП кольцо с двойным разрезом демонстрирует лучшие показатели силы магнито-левитационного взаимодействия в сравнении с классическим замкнутым кольцом, что, вероятно, обусловлено различиями в профилях поля остаточной намагниченности. Наибольшая отталкивающая сила достигается

при использовании незамкнутой обмотки, превосходя кольца с двойным разрезом более чем на 10%, и почти вдвое – обмотку с одинарным разрезом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>

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. Tomita M., Murakami M. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K // *Nature*. 2003. Vol. 421, N. 6922. P. 517–520. doi:10.1038/nature01350
2. Patel A., Baskys A., Mitchell-Williams T., et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape // *Superconductor Science and Technology*. 2018. Vol. 31, N. 9. P. 09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
3. Kovalev L., Ilushin K., Koneev S., et al. Hysteresis and reluctance electric machines with bulk HTS rotor elements // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 1999. Vol. 9, N. 2. P. 1261–1264. doi:10.1109/77.783530
4. Muta I., Jung H., Nakamura T., Hoshino T. Performance of axial-type motor with Bi-2223 HTS bulk rotor // *Physica C: Superconductivity*. 2002. Vol. 372. P. 1531–1534. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01078-X
5. Matsuzaki H., Kimura Y., Morita E., et al. HTS bulk pole-field magnets motor with a multiple rotor cooled by liquid nitrogen // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007. Vol. 17, N 2. P. 1553–1556. doi:10.1109/TASC.2007.898488
6. Hirakawa M., Inadama S., Kikukawa K., et al. Developments of superconducting motor with YBCO bulk magnets // *Physica C: Superconductivity*. 2003. Vol. 392. P. 773–776. doi:10.1016/S0921-4534(03)01213-9
7. Netter D., Leveque J., Ailam E., et al. Theoretical study of a new kind HTS motor // *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2005. Vol. 15, N. 2. P. 2186–2189. doi: 10.1109/TASC.2005.849608
8. Gao Y., Wang W., Wang X., et al. Design, fabrication, and testing of a YBCO racetrack coil for an HTS synchronous motor with HTS flux pump // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Vol. 30, N. 4. P. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2020.2971453

9. Ueno E., Kato T., Hayashi K. Race-track coils for a 3 MW HTS ship motor // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2014. Vol. 504. P. 111–114. doi: 10.1016/j.physc.2014.03.015
10. Tomkow L., Harca I., Machaj K., et al. Experimental system for testing a superconducting motor at temperatures close to 15 K // *Cryogenics*. 2020. Vol. 112. P. 103206. doi:10.1016/j.cryogenics.2020.103206
11. Climente-Alarcon V., Smara A., Tomkow L., et al. Testing of surface mounted superconducting stacks as trapped-flux magnets in a synchronous machine // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Vol. 30, N. 5. P. 1–8. doi: 10.1109/TASC.2020.2976603
12. Martins F.G.R., Sass F., Ferreira A.C., de Andrade R. A novel magnetic bearing using REBCO double crossed loop coils // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Vol. 28, N. 4. P. 1–5. doi:10.1109/TASC.2018.2813371
13. Levin G.A., Barnes P.N., Murphy J., et al. Persistent current in coils made out of second generation high temperature superconductor wire // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93, N. 6. P. doi: 10.1063/1.2969798
14. Santos B.M.O., dos Santos G., dos Reis Martins F.G., et al. Magnetic bearings with double crossed loops modelled with TA formulation and electric circuits // *Superconductivity*. 2023. Vol. 7. P. 100058. doi: 10.1016/j.supcon.2023.100058
15. Sheng J., Zhang M., Wang Y., et al. A new ring-shape high-temperature superconducting trapped-field magnet // *Superconductor Science and Technology*. 2017. Vol. 30. N 9. P. 094002. doi: 10.1088/1361-6668/aa7a51
16. Ali M.Z., Zheng J., Huber F., et al. 4.6 T generated by a high-temperature superconducting ring magnet // *Superconductor Science and Technology*. 2020. Vol. 33, N. 4. P. 04LT01. doi: 10.1088/1361-6668/ab794a
17. Barnes G., McCulloch M., Dew-Hughes D. Computer modelling of type II superconductors in applications // *Superconductor Science and Technology*. 1999. Vol. 12, N. 8. P. 518. doi:10.1088/0953-2048/12/8/308
18. Brambilla R., Grilli F., Martini L. Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors // *Superconductor Science and Technology*. 2006. Vol. 20, N. 1. P. 16. doi: 10.1088/0953-2048/20/1/004
19. Coombs T., Campbell A., Murphy A., Emmens M. A fast algorithm for calculating the critical state in superconductors // *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2001. Vol. 20, N. 1. P. 240–252. doi: 10.1108/03321640110359967
20. Huber F., Song W., Zhang M., Grilli F. The TA formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications // *Superconductor Science and Technology*. 2022. Vol. 35, N. 4. P. 043003. doi: 10.1088/1361-6668/ac5163
21. Morandi A. 2D electromagnetic modelling of superconductors // *Superconductor Science and Technology*. 2012. Vol. 25, N. 10. P. 104003. doi:10.1088/0953-2048/25/10/104003
22. Mykola S., Fedor G. A–V formulation for numerical modelling of superconductor

- magnetization in true 3D geometry // *Superconductor Science and Technology*. 2019. Vol. 32, N. 11. P. 115001. doi: 10.1088/1361-6668/ab3a85
23. Campbell A.M. A new method of determining the critical state in superconductors // *Superconductor Science and Technology*. 2007. Vol. 20, N. 3. P. 292. doi: 10.1088/0953-2048/20/3/031
24. Anischenko I., Pokrovskii S., Rudnev I., Osipov M. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations // *Superconductor Science and Technology*. 2019. Vol. 32, N. 10. P. 105001. doi: 10.1088/1361-6668/ab2bbe
25. Osipov M., Starikovskii A., Anishenko I., et al. The influence of temperature on levitation properties of CC-tape stacks // *Superconductor Science and Technology*. 2021. Vol. 34, N 4. P. 045003. doi: 10.1088/1361-6668/abe18e

REFERENCES

1. Tomita M, Murakami M. High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K. *Nature*. 2003;421(6922):517–520. doi: 10.1038/nature01350
2. Patel A, Baskys A, Mitchell-Williams T, et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(9):09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
3. Kovalev L, Ilushin K, Koneev S, et al. Hysteresis and reluctance electric machines with bulk HTS rotor elements. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 1999;9(2):1261–1264. doi:10.1109/77.783530
4. Muta I, Jung H, Nakamura T, et al. Performance of axial-type motor with Bi-2223 HTS bulk rotor. *Physica C: Superconductivity*. 2002;372:1531–1534. doi:10.1016/S0921-4534(02)01078-X
5. Matsuzaki H, Kimura Y, Morita E, et al. HTS bulk pole-field magnets motor with a multiple rotor cooled by liquid nitrogen. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2007;17(2):1553–1556. doi:10.1109/TASC.2007.898488
6. Hirakawa M, Inadama S, Kikukawa K, et al. Developments of superconducting motor with YBCO bulk magnets. *Physica C: Superconductivity*. 2003;392:773–776. doi:10.1016/S0921-4534(03)01213-9
7. Netter D, Leveque J, Ailam E, et al. Theoretical study of a new kind HTS motor. *IEEE transactions on applied superconductivity*. 2005;15(2):2186–2189. doi:10.1109/TASC.2005.849608
8. Gao Y, Wang W, Wang X, et al. Design, fabrication, and testing of a YBCO racetrack coil for an HTS synchronous motor with HTS flux pump. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020;30(4):1–5. doi:10.1109/TASC.2020.2971453
9. Ueno E, Kato T, Hayashi K. Race-track coils for a 3 MW HTS ship motor. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2014;504:111–114. doi:10.1016/j.physc.2014.03.015
10. Tomkow L, Harca I, Machaj K, et al. Experimental system for testing a superconducting motor at temperatures close to 15 K. *Cryogenics*. 2020;112:103206. doi:10.1016/j.cryogenics.2020.103206

11. Climente-Alarcon V, Smara A, Tomkow L, et al. Testing of surface mounted superconducting stacks as trapped-flux magnets in a synchronous machine. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020;30(5):1–8. doi:10.1109/TASC.2020.2976603
12. Martins FGR, Sass F, Ferreira AC, et al. A novel magnetic bearing using REBCO double crossed loop coils. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(4):1–5. doi:10.1109/TASC.2018.2813371
13. Levin GA, Barnes PN, Murphy J, et al. Persistent current in coils made out of second generation high temperature superconductor wire. *Applied Physics Letters*. 2008;93(6). doi:10.1063/1.2969798
14. Santos BMO, dos Santos G, dos Reis Martins FG, et al. Magnetic bearings with double crossed loops modelled with TA formulation and electric circuits. *Superconductivity*. 2023;7:100058. doi:10.1016/j.supcon.2023.100058
15. Sheng J, Zhang M, Wang Y, et al. A new ring-shape high-temperature superconducting trapped-field magnet. *Superconductor Science and Technology*. 2017;30(9):094002. doi:10.1088/1361-6668/aa7a51
16. Ali MZ, Zheng J, Huber F, et al. 4.6 T generated by a high-temperature superconducting ring magnet. *Superconductor Science and Technology*. 2020;33(4):04LT01. doi:10.1088/1361-6668/ab794a
17. Barnes G, McCulloch M, Dew-Hughes D. Computer modelling of type II superconductors in applications. *Superconductor Science and Technology*. 1999;12(8):518. doi:10.1088/0953-2048/12/8/308
18. Brambilla R, Grilli F, Martini L. Development of an edge-element model for AC loss computation of high-temperature superconductors. *Superconductor Science and Technology*. 2006;20(1):16. doi:10.1088/0953-2048/20/1/004
19. Coombs T, Campbell A, Murphy A, et al. A fast algorithm for calculating the critical state in superconductors. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2001;20(1):240–252. doi: 10.1108/03321640110359967
20. Huber F, Song W, Zhang M, et al. The TA formulation: an efficient approach to model the macroscopic electromagnetic behaviour of HTS coated conductor applications. *Superconductor Science and Technology*. 2022;35(4):043003. doi:10.1088/1361-6668/ac5163
21. Morandi A. 2D electromagnetic modelling of superconductors. *Superconductor Science and Technology*. 2012;25(10):104003. doi:10.1088/0953-2048/25/10/104003
22. Mykola S, Fedor G. A–V formulation for numerical modelling of superconductor magnetization in true 3D geometry. *Superconductor Science and Technology*. 2019;32(11):115001. doi:10.1088/1361-6668/ab3a85
23. Campbell AM. A new method of determining the critical state in superconductors. *Superconductor Science and Technology*. 2007;20(3):292. doi:10.1088/0953-2048/20/3/031
24. Anischenko I, Pokrovskii S, Rudnev I, Osipov M. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex

- configurations. *Superconductor Science and Technology*. 2019;32(10):105001. doi: 10.1088/1361-6668/ab2bbe
25. Osipov M, Starikovskii A, Anishenko I, et al. The influence of temperature on levitation properties of CC-tape stacks. *Superconductor Science and Technology*. 2021;34(4):045003. doi:10.1088/1361-6668/abe18e

Сведения об авторах:

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

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук;

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

Information about the authors:

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

Irina V. Martirosian, Candidate of Science 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

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst635142>

© Е.Л. Рыжова¹, В.Ю. Осипов²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

² Эксплуатационное локомотивное депо Саратов – Пассажирское
(Саратов, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Цель. Показать практическую значимость оценки технического состояния тяговых электродвигателей электропоездов при неуставившихся режимах работы на примере выявления характера и причин возникновения аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя НБ–520В в режиме тяги с помощью сравнительного анализа фрагментов файлов поездки электропоездов серии ЭП1 в условиях локомотивного депо.

Методы. Проведен обзор существующих инновационных методик исследования неуставившихся режимов работы тяговых электродвигателей локомотивов, которые можно использовать для определения причин возникновения аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя при различных режимах его работы. Исследование аварийного нарастания тока якоря было рассмотрено в режиме тяги, для чего проанализированы результаты фрагментов файлов поездки, полученных с помощью микропроцессорной системы диагностирования электропоезда ЭП1.

Результаты. Предлагаемые методы функционального диагностирования позволяют не только выявить развивающиеся неисправности и предотвратить необратимые явления в работе тяговых электродвигателей, но и обнаружить развивающиеся дефекты на ранней стадии, планировать сроки и объемы ремонта оборудования. Выявлены характер и причины возникновения аварийного нарастания тока якоря, «бросков» тока тягового электродвигателя НБ–520В в режиме тяги, которые являются следствием нарушения типовых эксплуатационных режимов электропоездов. Для определения причин данных неисправностей в условиях ремонтного депо разработан рекомендуемый порядок действий, при выявлении характера возникающих неуставившихся режимов работы тягового электродвигателя.

Заключение. Своевременная и верная диагностика тягового электродвигателя с целью выявления неисправностей даст возможность сократить время простоя электропоезда при неплановом ремонте, позволит предотвратить ненужные затраты на замену тягового электродвигателя. Разработанный алгоритм действий рекомендуется для определения причин аварийного нарастания тока якоря тягового электродвигателя в режиме тяги на основании выявленных закономерностей. Использование диагностических микропроцессорных систем электропоезда может помочь в разработке мероприятий, направленных на снижение и предупреждение данных неисправностей, что, в свою очередь, позволит снизить количество отказов на линии и уменьшить количество задержанных поездов. Кроме рекомендуемого порядка действий по выявлению неисправностей тягового двигателя, определены новые аспекты для создания комплексной информационно-измерительной системы контроля и диагностики с учетом текущего технического состояния оборудования

Ключевые слова: тяговый электродвигатель; диагностика; аварийное нарастание тока; ток якоря; токораспределение; термическое повреждение; сопротивление изоляции.

Как цитировать:

Рыжова Е.Л., Осипов В.Ю. Применение технических средств диагностирования тяговых двигателей подвижного состава // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 556–576. doi: 10.17816/transsyst635142

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© E.L. Ryzhova¹, V.Y. Osipov²¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)² Saratov – Passenger Operational Locomotive Depot
(Saratov, Russia)**THE USE OF TECHNICAL MEANS FOR DIAGNOSING
TRACTION ENGINES ROLLING STOCK**

Aim. Demonstrate the practical significance of assessing the technical condition of traction electric locomotives during unsteady operating modes by analyzing the nature and causes of an emergency increase in the armature current of the NB–520V traction motor in traction mode. This study uses comparative analysis of trip file fragments from EP1 series electric locomotives at a locomotive depot.

Methods. A review was conducted on innovative methods for studying the unsteady operating modes of traction electric motors in locomotives. These methods help determine the causes of emergency armature current increases under various operating conditions. The emergency increase in the armature current was considered in the traction mode, for which the results of the fragments of the trip files were analyzed using a microprocessor-based traction motor diagnostic system installed on an EP1 electric locomotive.

Results. The proposed diagnostic methods allow for the detection of developing malfunctions early, preventing irreversible damage in traction motor operations. These methods also help plan the timing and volume of equipment repairs. The study identified the nature and causes of emergency armature current surges in the NB-520V motor during traction mode, which were linked to violations in standard operating modes of electric locomotives. A recommended procedure was developed for use in repair depots to identify and address unsteady operating modes of the traction electric motor.

Conclusion. Timely and correct diagnosis of traction motors can significantly reduce downtime during unplanned repairs, avoiding unnecessary costs for motor replacements. The developed algorithm enables efficient identification of the causes of armature current surges in traction mode, using diagnostic microprocessor systems on electric locomotives. These systems help develop preventative measures, reducing motor failures on the line and train delays. In addition to the recommended procedure for detecting traction engine malfunctions, the study highlights new opportunities for creating an integrated information and measurement system for monitoring and diagnostics, based on the current technical condition of locomotive equipment.

Keywords: traction electric motor; diagnostics; emergency current build-up; armature current; current distribution; thermal damage; insulation resistance.

To cite this article:

Ryzhova EL, Osipov VYu. The use of technical means for diagnosing traction engines of rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):556–576. doi: 10.17816/transsyst635142

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от многих промышленных аналогов надежность функционирования тяговых электрических машин локомотивов в определяющей степени зависит от условий их работы в неустановившихся режимах. В первую очередь, это относится к тяговым электродвигателям (ТЭД), работа которых в реальных условиях эксплуатации сопровождается постоянными скачками токов и напряжений, изменением скорости движения в широком диапазоне значений, схемными переключениями, периодически возникающими случаями боксования и срабатывания аппаратов защиты. Поэтому знание и учет основных закономерностей и функциональных зависимостей, свойственных для неустановившихся режимов работы, является одним из основных условий правильного проектирования тяговых электрических машин и их надежной работы в реальных условиях эксплуатации.

Для тяговых электродвигателей локомотивов изучение неустановившихся режимов работы имеет особую актуальность и практическую значимость в связи с целым рядом особенностей их конструкции и условий, в которых они работают. Опыт эксплуатации и статистические наблюдения доказывают, что отказы тяговых электродвигателей локомотивов в условиях стационарной нагрузки, уровень которой не превышает регламентированных проектным расчетом значений, происходят крайне редко – только при наличии существенных дефектов, внесенных в их конструкцию в процессе производства или ремонта. В подавляющем большинстве случаев выход из строя узлов тяговых электродвигателей наблюдается при воздействии на них динамических перегрузок, возникновение которых обусловлено особенностями протекания переходных процессов. Нестационарные режимы для тяговых электродвигателей локомотивов являются специфической особенностью их условий работы в виде постоянно действующего фактора, который требует изучения и учета, поскольку выступает источником потенциально опасных перегрузок и как следствие, выхода ТЭД из строя [1–3].

**СОВРЕМЕННЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ**

В связи с вводом в эксплуатацию нового подвижного состава широко развиваются инновационные методы исследования состояния тяговых

двигателей, которые помогут сократить расход электроэнергии, времени и экономические затраты.

Методы теоретического расчета и математического моделирования неустановившихся режимов работы тяговых электродвигателей применяются для исследования особенностей поведения тяговых электродвигателей в нестационарных режимах работы и для количественной оценки возникающих динамических перегрузок в системе тягового привода. Система дифференциальных уравнений для описания работы ТЭД не имеет точного математического решения из-за появления ряда факторов при работе электрической машины в неустановившемся режиме: наличие индуктивностей обмоток машины нелинейного характера, процесс образования вихревых токов, описание параметров которых носит условный, гипотетический характер, и нелинейность индивидуальных для каждого двигателя магнитных свойств и характеристик его магнитопровода, и неоднородность трудно поддающихся расчету полей рассеяния обмоток двигателя и многое др. Поэтому в настоящее время методы расчета неустановившихся режимов работы тяговых электродвигателей сводятся к численному моделированию переходных режимов работы тяговых электродвигателей с использованием современных компьютерных средств.

Главным критерием соответствия расчетов электрических переходных процессов в тяговых электрических машинах реальному процессу их эксплуатации остается экспериментальная проверка математической модели. При экспериментальном изучении динамических процессов в силовых цепях тяговых электродвигателей, в первую очередь, приходится решать три технические проблемы: обеспечение одновременной записи на носители информации быстроменяющихся рабочих параметров машины, измерение больших токов и измерение высоких напряжений. Развитие цифровых технологий хранения и обработки информации привело к появлению многоканальных аналого-цифровых преобразователей в составе цифровых записывающих осциллографов, либо через специально разработанные программы-драйверы, устанавливаемые на управляющие результаты измерения ПЭВМ, позволяющие производить цифровую запись быстро протекающих переходных процессов тяговых электродвигателей. Вне зависимости от средств регистрации первичным источником сигналов выступают специализированные датчики, отображающие уровень рабочих параметров (величины токов, напряжений и параметры магнитного поля) машины и обеспечивающие электробезопасность при измерении силовых

токов и высоких напряжений через маломощные входы электронных устройств [4].

Среди современных методов исследования неустановившихся режимов работы ТЭД выделяется методика, основанная на выполнении мониторинга потребляемого тока с последующим выполнением спектрального анализа полученного сигнала, которая позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов двигателя. Наличие в спектре тока двигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части электродвигателя и связанного с ним механического устройства. Данным методом определяется наличие таких дефектов, как межвитковые замыкания обмоток статора, повреждения подшипников, ослабление элементов крепления электродвигателя, дефекты механической передачи, несоосность валов двигателя и механической нагрузки. Серьезность повреждений определяется сравнением величины сигнала на характерной частоте повреждения с величиной сигнала на частоте питающей сети. Частоты, характерные для отдельных видов повреждений, совпадают очень редко. Диагностика тока и последующий спектральный анализ позволяют обеспечить разрешение по частоте до 0,01 Гц. Когда частоты от различных повреждений совпадают, необходимо дальнейшее уточнение характера дефекта с использованием традиционно применяемых методов диагностики. Недостатком спектрального анализа тока двигателя является сложность оценки результатов. Любая амплитудно-модулируемая частота учитывается в спектре дважды, по обе стороны питающего напряжения. Двойной учет модулируемой частоты обуславливает недостаточную точность диагностирования и отсутствие возможности увеличения числа анализируемых гармоник.

Для исключения наложения частот от различных повреждений и, как следствие, искажения картины реального состояния двигателя используется метод анализа спектров модулей векторов Парка тока (PI) и напряжения (PU). В отличие от простого спектрального анализа сигналов тока, при формировании спектров модуля вектора Парка любая модулируемая амплитудной модуляцией характерная частота учитывается в спектре вектора Парка только один раз. Гармоники в спектре PI, соответствующие различным видам неисправностей, отличаются друг от друга. Таким образом, выявление в спектре PI характерных гармоник достоверно и однозначно свидетельствует о наличии электрических и механических неисправностей в электродвигателе и приводе им

в действие устройстве. Дополнительно к измерению потребляемого тока проводится мониторинг приложенного к электродвигателю напряжения с целью определения причин возникновения выявленных повреждений, которые могут быть обусловлены качеством питающего напряжения. Результаты мониторинга приложенного напряжения учитываются при прогнозировании развития повреждения и определении остаточного ресурса электродвигателя. Учет мониторинга напряжения позволяет более точно прогнозировать развитие повреждений, обусловленных качеством питающего электродвигатель напряжения.

Таким образом, метод на основе спектрального анализа модуля вектора Парка тока и напряжения представляет собой достоверный, эффективный и удобный метод выявления дефектов и повреждений электродвигателей и связанных с ними механических устройств, позволяет исключить двойной учет модулируемой частоты, что обеспечивает повышение точности диагностики. Упрощенная процедура диагностирования, возможность проведения диагностики в дистанционном режиме и полной автоматизации процесса диагностики позволяют проводить регулярные измерения параметров большого количества электродвигателей, накапливать базу данных измерений, отслеживать динамику фактического развития отдельных повреждений и прогнозировать их дальнейшее развитие и остаточный ресурс оборудования. Реализация технологии обслуживания оборудования по фактическому состоянию посредством применения данного метода обеспечивает снижение до минимума ущерба предприятия от аварийных отказов оборудования за счет раннего обнаружения зарождающихся дефектов и контроля развития повреждений [5].

Разработано и успешно применяется в депо большое количество методов оценки технического состояния тяговых электродвигателей, в том числе, автоматизированных, основанных на различных диагностических параметрах, которые позволяют контролировать исправность всех составляющих ТЭД и реализовать систему ремонта с учетом фактического состояния узлов локомотива. Наиболее перспективным является использование комбинированных методов диагностики, учитывающих несколько диагностических параметров в едином комплексе.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Цель технического диагностирования ТЭД – выявление несоответствия свойств двигателя заданным или требуемым

характеристикам, определение вида, расположения и причин появления неисправностей. К основным задачам диагностирования ТЭД относятся: контроль технического состояния двигателя, поиск места и определение причины неисправности, а также прогнозирование технического состояния на определенный промежуток времени. Ожидаемая технико-экономическая эффективность применения конкретного средства технического диагностирования в значительной степени зависит от того, насколько полно на начальной стадии их разработки проработаны вопросы, связанные с будущей практической эксплуатацией того или иного диагностического устройства. По сравнению с планово-предупредительной системой ремонта и обслуживания тягового подвижного состава, действующей в настоящее время на сети железных дорог Российской Федерации, ремонт по фактическому состоянию является наиболее экономичным. Данная система текущего ремонта возможна при наличии достоверной информации о техническом состоянии узлов и агрегатов локомотивов [6–8].

В процессе эксплуатации электровозов серии ЭП1 может возникнуть неисправность, которая характеризуется аварийным нарастанием тока якоря – это явление, которое может произойти в электродвигателях, когда ток, протекающий через якорь ТЭД, возрастает до опасного уровня. Это может произойти по различным причинам, включая короткое замыкание, перегрузку, механические неисправности или неисправности в системе управления. При аварийном нарастании тока якоря наблюдается перегрев обмоток и других частей двигателя, что может вызвать повреждения изоляции и даже выход его из строя, повреждения якоря, щеток, коллектора и других узлов, что приведет к необходимости их ремонта или замены, а также к снижению общей эффективности работы ТЭД и увеличению потерь.

Аварийное нарастание тока якоря является следствием какой-либо неисправности ТЭД или режима его работы и выявляется по данным микропроцессорных систем управления и диагностики (МСУД), установленных на электровозе [9, 10]. Неисправность, характеризующаяся аварийным нарастанием тока тягового электродвигателя электровозов в различных режимах работы, может быть связана с несколькими факторами, которые требуют диагностики и последующего устранения. Вот некоторые возможные причины данного явления:

1. Возникновение сбоев в работе системы управления из-за неисправности датчиков или контроллеров.

2. Плохие или окисленные контактные соединения в цепи могут приводить к увеличению сопротивления и, как следствие, скачкам тока.
3. Механические неисправности – заедание подшипников, износ колесной пары или других механических элементов могут создать дополнительное сопротивление и привести к увеличению тока.
4. Короткие замыкания или пробой в изоляции обмоток двигателя.
5. Нестабильное питание, скачки напряжения или отсутствие одной из фаз.

В отличие от аварийного нарастания тока якоря «броски» тока тягового электродвигателя – это резкое внезапное и кратковременное изменение величины тока в цепи питания тяговых двигателей электровозов, возникающее из-за включения или отключения электрических устройств или из-за электромагнитных помех. Временное превышение номинального значения тока наблюдается при запуске, ускорении или при преодолении сопротивления движению. Переходные режимы с бросками тока наиболее часто происходят при колебаниях напряжения контактной сети, а также при восстановлении напряжения после кратковременного снятия, вызванного отрывом токоприемника или автоматическим повторным включением защиты на тяговых подстанциях. Факторы, способствующие броскам тока, могут включать [11]:

1. Увеличение нагрузки, например, при начале движения локомотива или при следовании по подъему;
2. Отрыв токоприемника от контактного провода с последующим восстановлением контакта.

Ограничения системы, например, по току, установленные для защиты оборудования.

Резкие изменения тока могут вызвать перегрузку, привести к ускорению износа двигателя, вызвать пульсации напряжения, повреждение электронных компонентов электровоза. Поэтому важно контролировать такие пики и принимать меры для их минимизации.

Для анализа причин возникновения выявленных неисправностей при неустановившихся режимах работы тяговых электродвигателей могут использоваться различные методы, включая математическое моделирование, экспериментальные измерения и мониторинг состояния оборудования. Отделение аварийного нарастания тока якоря от резких бросков тока в эксплуатационных режимах может быть выполнено с использованием нескольких методов:

1. Отслеживание величины тока, по временным характеристикам на осциллографе или специализированном оборудовании. Аварийные нарастания тока, как правило, имеют быстрое, резкое изменение, в то время как типовые режимы будут показывать более плавные изменения.
2. Выявление предельных значений тока для нормальных режимов работы ТЭД, превышение значения которых, может указывать на возможное аварийное состояние.
3. Использование термодатчиков для мониторинга температуры в аварийных ситуациях может помочь выявить ненормальные увеличения температуры проводников и оборудования до того, как они приведут к серьезным последствиям.
4. Определение наличия неисправностей с использованием методов функциональной диагностики, таких как контроль за состоянием изоляции, анализ вибраций.
5. Ведение документации с фиксацией резких изменений тока при типовых режимах работы двигателя для идентификации причин, вызывающих эти колебания тока (циклы включения/выключения, нагрузочные колебания и т.д.).
6. Использование современных систем мониторинга для предсказания поведения тока в зависимости от нагрузок, что позволяет обеспечивать раннее выявление неисправностей.

Важно понимать, что комбинация этих методов может дать более полное представление о работе ТЭД и помочь более точно отделить аварийные ситуации от нормальных эксплуатационных колебаний. После выявления точной причины неисправности возможны корректные меры по её устранению, что позволит предотвратить повторные случаи резких изменений тока и обеспечить надежную эксплуатацию электровоза [12].

В процессе исследования рассмотрены три фрагмента файла поездки МСУД трех электровозов, на которых выявлено аварийное нарастание тока тягового электродвигателя НБ-520В в режиме тяги. На основании полученных данных в ходе поездки электровозов произведен краткий сравнительный анализ фрагментов трех поездок [13, 14].

При моделировании поездки электровоза в пути следования возникла аварийная ситуация, при которой происходило срабатывание аппарата защиты. При детальном рассмотрении фрагмента № 1 файла поездки МСУД (Рис. 1) видно, что аварийное нарастание тока произошло при скорости движения 19 км/ч на 4-м тяговом электродвигателе НБ-520В. Ток якоря

составляет 411 А, при этом на тяговых электродвигателях: 1, 2, 3, 5, 6 ток якоря составляет 140 А. То есть ток якоря 4-го ТЭД в 3 раза больше, чем на остальных тяговых электродвигателях. Линия тока якоря 4-го ТЭД имеет форму «пилы», а ток якоря 5 и 6 тяговых электродвигателей имеют схожую форму, но значение тока меньше. Для формы тока в виде «пилы» характерным является изменение значения тока якоря от наименьшего значения к наибольшему и, наоборот, в течение минуты с интервалом в одну секунду. В результате нестабильной работы 4-го ТЭД произошло нарушение токораспределения на двух других тяговых электродвигателях, которые входят во вторую группу управления, что свидетельствует о наличии обрыва в цепи самого тягового электродвигателя или о наличии межвиткового замыкания в одной из обмоток неисправного тягового электродвигателя.

При рассмотрении фрагмента №2 файла поездки МСУД (Рис. 2) видно, что аварийное нарастание тока произошло на 2-м тяговом электродвигателе НБ-520В. При скорости движения 26 км/ч на 2-м ТЭД ток якоря составляет 830 А, а на тяговых электродвигателях 1, 3, 4, 5, 6 – от 256 до 330 А. То есть ток якоря 2-го ТЭД в 4 раза выше, чем на остальных тяговых электродвигателях. При дальнейшем следовании электровоза на полной тяге всех электродвигателей на 2-м ЭД ток якоря начал превышать значение в 1160 А, при этом, так же, как и до резкого увеличения тока, продолжало наблюдаться нарушение токораспределения на 1-м и на 3-м тяговых электродвигателях (Рис. 3). В течение времени следования локомотива линия значения тока 2-го тягового электродвигателя характеризуется неравномерностью, то есть наблюдается мгновенное увеличение значения тока якоря через одинаковые временные промежутки.

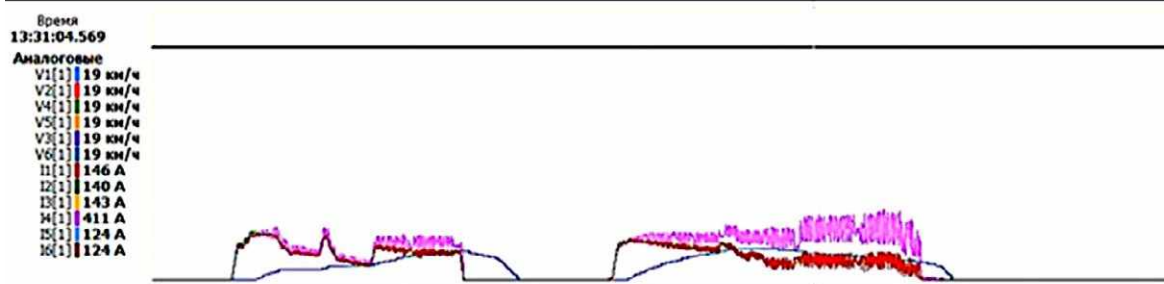


Рис. 1. Фрагмент файла поездки № 1

Fig. 1. Fragment of trip file № 1

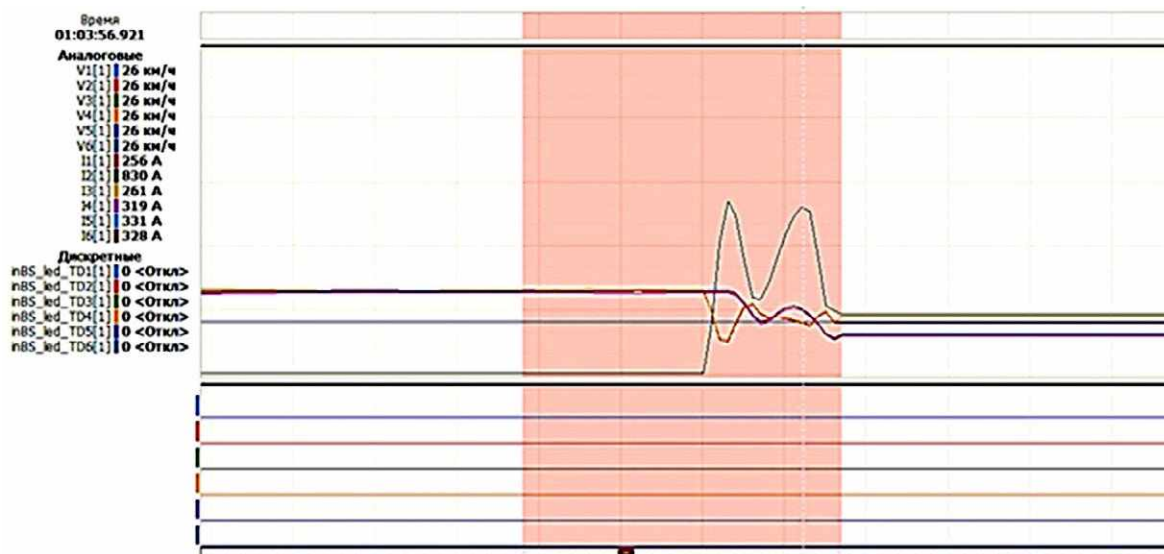


Рис. 2. Фрагмент файла поездки № 2

Fig. 2. Fragment of trip file № 2

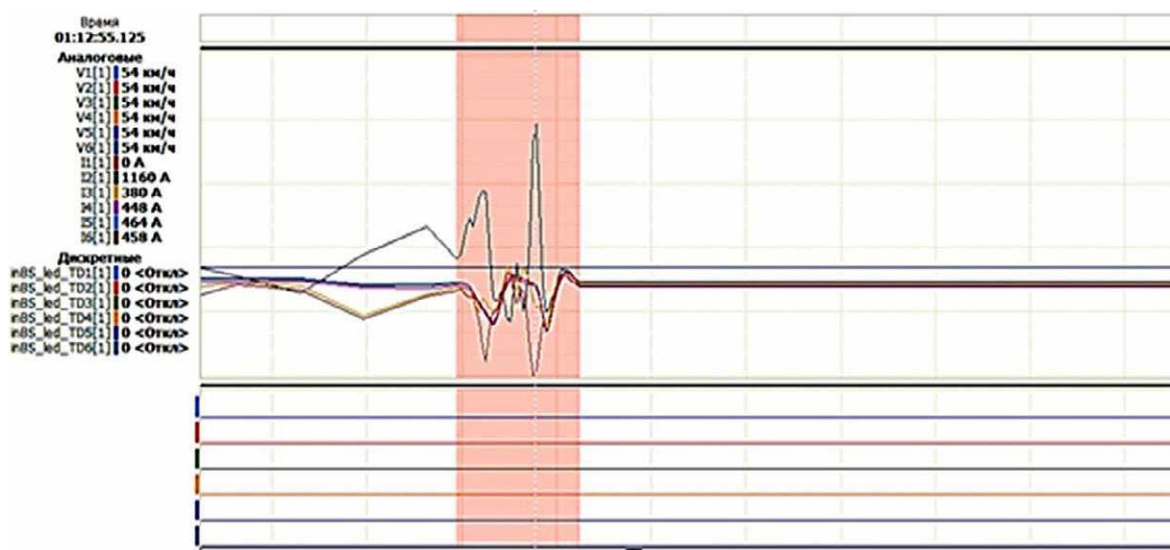


Рис. 3. Фрагмент файла поездки № 2 при следовании электровоза на полной тяге

Fig. 3. Fragment of the file of trip № 2 when following an electric locomotive at full thrust

Для определения конкретной причины неисправности была произведена проверка целостности цепи электрической схемы электровоза. Путем прикладывания щупов мультиметра к выводам тормозного переключателя был выявлен обрыв в электрической цепи электровоза. При проверке шинного монтажа тормозного переключателя было выявлено термическое разрушение шины в районе силового кулачкового контактора

тормозного переключателя QT1 блока силовых аппаратов (БСА1) (Рис. 4), а также термическое повреждение самого кулачкового контактора. Термическое повреждение (отгар) шины 2-го тягового электродвигателя произошел в виду ослабления болтового крепления силовых шин, идущих к кулачковому контактору тормозного переключателя QT1 БСА1 в результате отсутствия достаточного момента силы, необходимого для затяжки данных болтовых соединений при проведении цикловых работ при плановых видах ремонта. В результате этого в процессе эксплуатации электровоза от вибрации внутри кузова произошло максимальное ослабление данного болтового крепления, что и привело к термическому повреждению шин.

Следующая аварийная ситуация описывается фрагментом № 3 файла поездки МСУД, при детальном рассмотрении которого видно, что при скорости движения 54 км/ч на 2-м тяговом электродвигателе НБ-520В ток якоря меняет свои значения от 200 А до 450 А, а на тяговых электродвигателях 1, 3, 4, 5, 6 ток якоря находится в пределах 440 А. Линия тока якоря 2-го тягового электродвигателя характеризуется хаотичным изменением значений тока (Рис. 5).

При поиске причины неисправности было выявлено, что на клеммной рейке МСУД-Н не надежно зафиксирован провод, идущий от датчика ЛЕМ 2-го тягового электродвигателя, изображенного на электрической

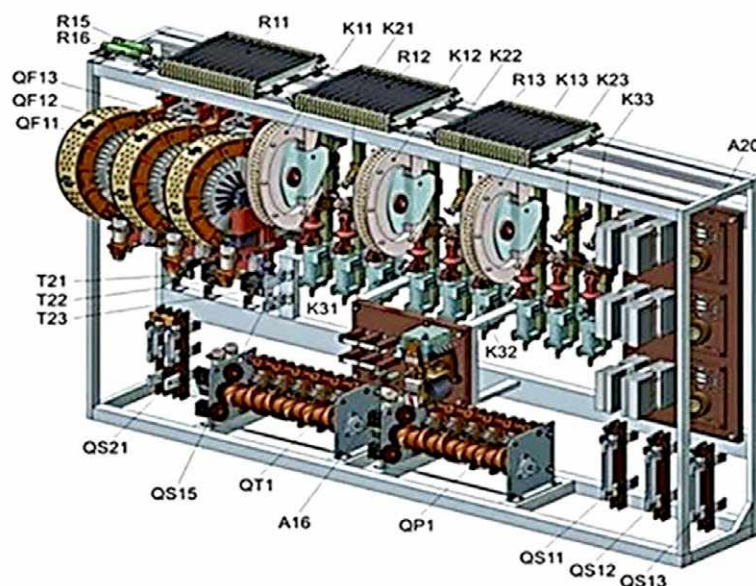


Рис. 4. Блок силовых аппаратов БСА1 [5]

Fig. 4. Block of power apparatuses BSA1 [5]

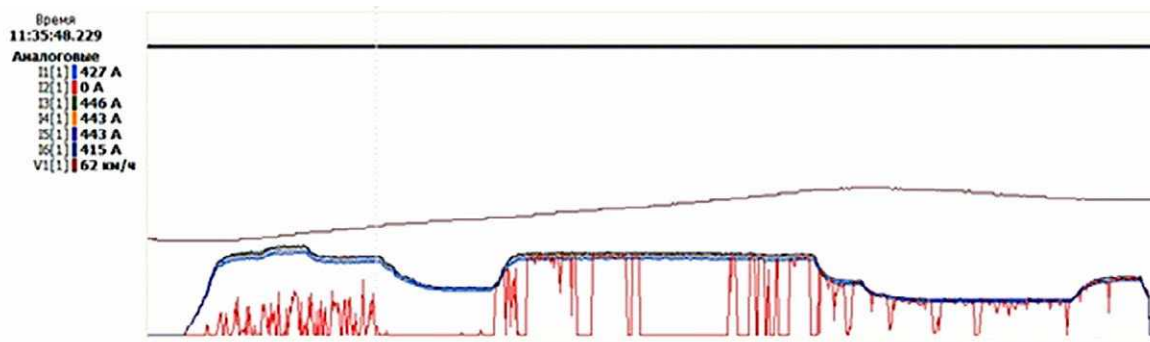


Рис. 5. Фрагмент файла поездки № 3

Fig. 5. Fragment of trip file № 3

схеме Т22 (Рис. 4), что в свою очередь привело к искажению значений тока якоря 2-го тягового электродвигателя.

Таким образом, при сравнении двух фрагментов файлов поездок, полученных с МСУД двух разных электровозов серии ЭП1, выявлено, что основным отличием между ними является форма линии тока якоря неисправного ТЭД: в первом случае линия тока якоря имеет форму «пилы», тогда как во втором случае наблюдаются мгновенные «броски» тока с таким же стремительным снижением его значения, но количество таких «скачков» в течение одной минуты значительно меньше, чем в первом случае и они распределены неравномерно.

Для устранения неисправности тягового электродвигателя – аварийного нарастания тока предусмотрена комплексная проверка следующими шагами:

- Проверка состояния контактных соединений и их очистка.
- Измерение параметров системы управления и ее тестирование на наличие ошибок.
- Визуальный осмотр механических и электрических частей двигателя.
- Измерение токов и напряжений в рабочем режиме.
- Проверка состояния обмоток на наличие коротких замыканий и других неисправностей.

Для выявления причин возникновения «бросков» тока в тяговом электродвигателе НБ-520В электровозов серии ЭП1 в условиях ремонтного депо рекомендуется следовать следующему алгоритму действий:

1. Визуальный осмотр:

- Проверить состояние электродвигателя на наличие видимых повреждений, трещин, коррозии.

- Осмотреть подводящие кабели и соединения на предмет повреждений, плохих контактов или перегревов
- Проверить шинный монтаж силовой схемы электровоза, целостность силовой электрической цепи тягового электродвигателя.
- Убедиться, что питающие провода исправны и правильно подключены: разъединитель QS11-13 БСА1 или БСА2 должен быть отключен (выбор разъединителя зависит от вида испытываемого тягового электродвигателя)
- Убедиться в отсутствии посторонних предметов, мешающих работе двигателя.

2. Проверка электропитания:

- Измерить напряжение на выходе источника питания.
- Проверить наличие напряжения на клеммах электродвигателя.
- Провести замеры токов на разных режимах работы и обработать полученные данные для анализа.

3. Измерение сопротивления обмоток:

- При помощи миллиомметра измерить сопротивление обмоток.
- Сравнить результаты с нормами, указанными в технической документации: сопротивление изоляции обмоток постоянному току при +20 °С:
 - цепи всех катушек главных полюсов (без шунта), Ом: 0,00655...0,00725
 - цепи всех катушек добавочных полюсов и компенсационной обмотки, Ом: 0,01305...0,01145;
 - обмотки якоря, Ом: 0,0115...0,0127.

- провести проверку якорной обмотки тягового электродвигателя. Для этого необходимо перевести реверсор QR1 в «нейтральное положение» и исключить его из цепи путем укладки диэлектрического материала между контактами реверсора. Далее приложить щупы мультиметра или мегаомметра на выводы соответствующего тягового электродвигателя. Для проверки обмотки возбуждения отдельно от цепи необходимо также вывести реверсор из цепи способом, указанным выше, и приложить щупы мультиметра или мегаомметра на соответствующие выводы обмотки возбуждения.

4. Проверка изоляции:

- Использовать мегомметр для проверки сопротивления изоляции обмоток к корпусу и между обмотками: (должно быть не менее 2,5 МОм).

- Обратить внимание на состояние изоляционных материалов.
- 5. Тестирование на нагрузку:
- Подключить электродвигатель к тестовой нагрузке и измерить его параметры (ток, напряжение, мощность).
- Проверить, корректно ли работает двигатель под нагрузкой.
- 6. Проверка отсутствия повреждений в электродвигателе:
- Проверить состояние коллектора и щеток, убедиться в их исправности и правильном контакте: проверить состояние коллекторно-щеточного аппарата (необходимо проворачивать траверсу) на наличие переброса электрической дуги, открыв смотровые люки неисправного ТЭД. Проверить целостность изоляции обмоток в пределах возможной видимости. Проверить положение нейтрали.
- 7. Проверка работы системы охлаждения:
- Убедиться в отсутствии перегрева двигателя.
- Проверить работоспособность системы вентиляции и других элементов, отвечающих за охлаждение.
- 8. Акустическая диагностика:
- Обратить внимание на звуки, издаваемые двигателем (шумы, стуки, вибрации), которые могут указывать на механические неисправности.
- 9. Проверка механизмов управления:
- Осмотреть и протестировать элементы управления.
- Убедиться в корректности работы датчиков и исполнительных механизмов, управляющих питанием двигателя: проверить надежность крепления проводов датчиков LEM на самих датчиках, а также на клеммной рейке МСУД-Н.
- 10. Поиск механических неисправностей:
- Проверить подшипники, валы и другие механические элементы на наличие износа или повреждений.
- 11. Сравнительный анализ полученных данных с нормами и предыдущими показателями для выявления отклонений и аномалий.

Процесс диагностики должен быть организован последовательно и систематично с фиксацией всех результатов для дальнейшего анализа и принятия решений по устранению неполадок, следуя предписаниям технической документации и соблюдая правила безопасности [6–8].

Для сокращения времени нахождения электровоза серии ЭП1 в неэксплуатируемом парке и для выявления возможного предотказного состояния тягового электродвигателя или неисправности его электрической схемы к вышеизложенному алгоритму рекомендуется применять файлы

поездов микропроцессорной системы диагностирования (МСУД-Н), которые в соответствии с замечаниями, зафиксированными в журнале технического состояния локомотива формы ТУ-152, необходимо расшифровать, сравнить полученные данные с уже имеющейся базой данных неисправностей тягового электродвигателя. На основании полученных результатов расшифровки файлов поездки и вышеперечисленных проверок ремонтному персоналу необходимо произвести диагностику ТЭД и сделать заключение о причинах возникших неисправностей.

Согласно проведённым экспериментальным исследованиям на натурном образце тягового электродвигателя НБ-520В, подтверждена эффективность предложенного алгоритма поиска неисправностей, приводящих к броскам в ТЭД, внедрение которого может существенно снизить риск возникновения кругового огня на коллекторе, что, в свою очередь, повысит общую надежность и безопасность функционирования устройства. Это открывает новые возможности для улучшения эксплуатации тяговых электродвигателей с высокой степенью надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные неисправности не всегда относятся к неустановившимся режимам работы тяговых электродвигателей. На основании экспериментальных данных и анализа файлов поездок МСУД можно убедиться, что характер и причина возникновения неисправностей в режиме тяги одинаковы для всех испытуемых ТЭД лишь на первый взгляд, но при проведении анализа файлов поездок МСУД становится понятно, что имеются различия в результатах их диагностики. Для устранения выявленных неисправностей ТЭД в режиме тяги в условиях депо необходимо произвести проверку целостности силовой электрической схемы электровоза, не производя замену тягового электродвигателя. Замена тягового электродвигателя крайне трудоемкий процесс и будет выполняться как сверхцикловые работы. В данном случае своевременная и верная диагностика неисправностей двигателя даст возможность сократить время простоя электровоза при неплановом виде ремонта, а также позволит исключить затраты на замену ТЭД.

Диагностика и определение причин неисправностей тягового электродвигателя в режиме тяги требует систематического и комплексного подхода. Данный алгоритм оценки технического состояния тягового двигателя электровоза разработан на основании выявленных закономерностей и является рекомендацией. В процессе дальнейших

исследований методов диагностики и закономерностей возникновения неисправностей тяговых электродвигателей электровозов данный материал будет совершенствоваться и дополняться.

Кроме рекомендуемого порядка действий определение причин неисправностей тягового двигателя может включать несколько новых ключевых аспектов [3]:

1. Изучение и использование уже имеющихся эксплуатационных данных о работе электродвигателя, включая режимы нагрузки, частоту срабатываний защитных устройств, и анализ отклонений от нормальной работы.
2. Применение современных неразрушающих методов диагностики, позволяющих выявить скрытые дефекты на ранних стадиях, таких как ультразвуковая диагностика, термография, вибродиагностика и анализ спектра шумов.
3. Применение компьютерного моделирования и симуляции для прогнозирования поведения электродвигателя в различных эксплуатационных условиях может помочь в понимании, как изменения в конструкции или условиях эксплуатации могут повлиять на производительность ТЭД.
4. Внедрение мониторинга в реальном времени с помощью систем Интернета вещей (IoT), которые могут передавать данные о состоянии электродвигателя в облако для последующего анализа и использовать алгоритмы машинного обучения для предсказания возможных неисправностей.
5. Установление системы обратной связи при взаимодействии с эксплуатационным персоналом с целью получения информации о работе системы в режиме реального времени и потенциальных проблемах, которые могут быть не зафиксированы диагностическими системами.

Применение современных информационных технологий, средств диагностики, вычислительной техники, автоматизированных систем неразрушающего контроля позволяет создать информационно-технические комплексы по управлению системой ремонта, перейти к организации ремонта с учетом технического состояния оборудования на основе предупреждения отказов в пути следования и рационального использования ресурса оборудования подвижного состава для обеспечения требуемого уровня надежности и экономичности [15]. Создание комплексной информационно-измерительной системы контроля

и диагностики позволяет автоматизировать технологию и организацию технического обслуживания и текущего ремонта электровозов, учитывая информацию о реальном техническом состоянии узлов и агрегатов локомотива.

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. Дурандин М.Г. Работа тяговых электродвигателей в неустановившихся режимах: конспект лекций. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://h.twirpx.one/file/2435648/.pdf>
2. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://dntb-centr.ru/b/383?ysclid=lziaaio7od305187170.pdf>
3. Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д транспорта. М.: УМК МПС России, 2000. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://pomogala.ru/books_9_tyaga/osnovy_tyagi_poezdov_osipov.html
4. Классификация методов диагностирования тяговых электродвигателей. Лекция. 2024. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://lektsia.com/8x4871.html?ysclid=m1e1u4ssiq106233570>
5. Современные инновационные методы диагностирования тяговых электродвигателей. Лекция. 2024. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://lektsia.com/8x4872.html?ysclid=m1e1jfsjt0539678066>
6. Буйносов А.П., Стаценко К.А. Техническая диагностика электроподвижного состава: учебно-методическое пособие по дисциплине «Техническая диагностика электроподвижного состава» для студентов специальности 190303 – Электрический транспорт железных дорог. Федеральное агентство ж.-д. трансп. Уральский гос. ун-т путей сообщ. Каф: «Электрическая тяга». Екатеринбург: УрГУПС, 2008. EDN: UCWJQA
7. Бобровников Я.Ю., Стецюк А.Е. Диагностические комплексы электроподвижного состава: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/6257526/diagnosticheskie-kompleksy-elektropodvizhnogo-sostava?ysclid=m1e2gmt4du528934562.pdf>
8. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2023. EDN: CFRVMO

9. Якушев А.Я. Автоматизированные системы управления электрическим подвижным составом: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016.
10. Семченко В.В. Эксплуатация и техническое обслуживание электронных систем управления электровозов переменного тока. Красноярск: ДЦВ Красноярской железной дороги, 2010. С. 69–72.
11. Плакс А.В., Ширяев А.В., Брагин А.Г. Ограничение бросков тока в тяговом приводе электроподвижного состава с микропроцессорным управлением импульсным регулятором напряжения: материалы временных коллективов. В кн.: Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: Тезисы докл. междунар. симпозиума Eltrans>2001. СПб.: ПГУПС, 2001. С. 111. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://biblioserver.usurt.ru/cgi-bin/irbis64r_13/cgiirbis_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=TFZHT&P21DBN=TFZHT&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=1&S21P03=A=&S21STR=Плакс,%20Алексей%20Владимирович
12. Коньков А.Ю. Основы технической диагностики локомотивов: учеб. пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. Дата обращения: 23.09.2024. Режим доступа: https://scb/uploaded/1_1361365445.pdf?ysclid=m1e2652qf9261594189
13. Дорохина Е.С. Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. EDN: ZPSIOJ
14. Вольвич А.Г., Орлов Ю.А., Щербаков В.Г. Математическое моделирование многомоторного тягового электропривода с двигателями независимого возбуждения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 2. С. 38–42. EDN: LHMHED
15. Лапицкая Г.А. Инновационные технологии неразрушающего контроля и технической диагностики тепловозов. В кн.: Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 10–11 ноября 2016 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2016. С. 92–98. EDN: XWXYR

REFERENCES

1. Durandin MG. *Operation of traction electric motors in unsteady modes: lecture notes*. Yekaterinburg: UrGUPS; 2016. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://h.twirpx.one/file/2435648/.pdf>
2. Kuzmich VD, Rudnev VS, Frenkel SYa. *Theory of locomotive traction: textbook for universities of railway transport*. Moscow: Marshrut; 2005. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://dntb-centr.ru/b/383?ysclid=lziaaio7od305187170.pdf>
3. Osipov SI, Osipov SS. *The basics of train traction: mextbook for students of technical schools and colleges of railway transport*. Moscow: UMK MPS of Russia, 2000.

- (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://pomogala.ru/books_9_tyaga/osnovy_tyagi_poezdov_osipov.html.pdf
4. Classification of diagnostic methods for traction electric motors. Lecture. 2024. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://lektsia.com/8x4871.html?ysclid=m1e1u4ssiq106233570>
 5. Modern innovative methods of diagnosing traction electric motors. Lecture. 2024. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://lektsia.com/8x4872.html?ysclid=m1e1jfsjt0539678066>
 6. Buinosov AP, Statsenko KA, Buinov AP, Statsenko KA. *Technical diagnostics of electric rolling stock: an educational and methodological manual on the discipline «Technical diagnostics of electric rolling stock» for students of the specialty 190303 – Electric transport of railways. Federal Agency of Railway Transport, Ural State University ways of communication, Office: «Electric traction». Yekaterinburg: UrGUPS; 2008. (In Russ.) EDN: UCWJQA*
 7. Bobrovnikov YaYu, Stetsyuk AE. *Diagnostic complexes of electric rolling stock: textbook the manual*. Khabarovsk: DVGUPS; 2012. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://studylib.ru/doc/6257526/diagnosticheskie-kompleksy-elektropodvizhnogo-sostava?ysclid=m1e2gmt4du528934562>
 8. Melnikov VA. Improvement of methods for diagnosing 2TE116U diesel locomotives using data from on-board control systems. [dissertation] Moscow; 2023. (In Russ.) EDN: CFRVMO
 9. Yakushev AY. *Automated control systems for electric rolling stock: textbook the manual*. Moscow: Educational and methodological center for education in railway transport; 2016. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://djvu.online/file/R7Q3Zr8mpDuAy>
 10. Semchenko VV. *Operation and maintenance of electronic control systems of electric locomotives of alternating current*. Krasnoyarsk: DCV of the Krasnoyarsk Railway; 2010:69–72. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004963946?ysclid=lziu4zxikq36401649>
 11. Plaks AV, Shiryayev AV, Bragin AG. Limitation of current surges in a traction drive of an electric rolling stock with microprocessor control of a pulse voltage regulator: materials of temporary collectives. In: *Electrification and development of railway transport in Russia. Traditions, modernity, prospects: Abstracts of the International Conference. Symposium Eltrans'2001*. St. Petersburg: PGUPS; 2001. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://biblioserver.usurt.ru/cgi-bin/irbis64r_13/cgiirbis_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=TFZHT&P21DBN=TFZHT&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=1&S21P03=A=&S21STR=Плакс,%20Алексей%20Владимирович
 12. Konkov AY. *Fundamentals of technical diagnostics of locomotives: textbook the manual*. Khabarovsk: DVGUPS; 2007. (In Russ.) [cited: 23.09.2024]. Available from: https://scb/uploaded/1_1361365445.pdf?ysclid=m1e2652qf9261594189
 13. Dorokhina ES. Monitoring of the thermal state of asynchronous traction electric motors [dissertation] Tomsk; 2015. (In Russ.) EDN: ZPSIOJ

14. Volvich AG, Orlov YuA, Shcherbakov VG. Mathematical modeling of a multi-motor traction electric drive with independent excitation motors. *Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Technical sciences*. 2010;(2):38–42. (In Russ.) EDN: LHMHED
15. Lapitskaya, GA. Innovative technologies of non-destructive testing and technical diagnostics of locomotives. In: *Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of the Third All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Omsk, November 10–11, 2016*. Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2016. pp. 92–98. (In Russ.) EDN: XWXYR

Сведения об авторах:

Рыжова Елена Львовна, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1880-3372; ORCID: 0000-0001-7984-2558;

E-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Осипов Владислав Юрьевич, ведущий технолог;

eLibrary SPIN: 9408-0251; ORCID: 0009-0009-4566-3274;

E-mail: osipov.power@yandex.ru

Information about the authors:

Elena L. Ryzhova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 1880-3372; ORCID: 0000-0001-7984-2558;

E-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Vladislav Yu. Osipov, leading technologist;

eLibrary SPIN: 9408-0251; ORCID: 0009-0009-4566-3274;

E-mail: osipov.power@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst635951>

© И.П. Попов

Курганский государственный университет
(Курган, Россия)

БАЛКА С ПОВЫШЕННОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Цель. Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, что позволит расширить ассортимент строительных изделий.

Материалы и методы. Используется методика геометрической оптимизации и мысленного эксперимента.

Результаты. Трубчатая балка с жидким наполнителем (гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью. При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться. Следовательно, внутренний объем трубы стремится к уменьшению. Но, поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

Заключение. Получена оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой балкой и в десятикратном по сравнению с трубчатой балкой.

Ключевые слова: трубчатая балка; двутавровая балка; гидравлическая балка; жидкий наполнитель; полость.

Как цитировать:

Попов И.П. Балка с повышенной несущей способностью для мостовых пролетных строений // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 577–586. doi: 10.17816/transsyst635951

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

© **I.P. Popov**

Kurgan State University
(Kurgan, Russia)

HIGH-LOAD BEAM FOR BRIDGE SPAN STRUCTURES

Aim. This work aims to increase the load-bearing capacity of tubular beams, allowing for a wider range of construction products.

Materials and Methods. The study utilizes geometric optimization methods and hypothetical experiments.

Results. A tubular beam with a liquid filler (hydraulic beam) is a round pipe, plugged at both ends, completely (without air pockets) filled with liquid. When the hydraulic beam is subjected to load, its side surface tends to deform. However, since the liquid inside is incompressible, it resists any reduction in volume. This resistance prevents the pipe from deforming under stress.

Conclusion. The load-bearing capacity of a hydraulic beam is five times higher than that of an I-beam and ten times higher than that of a tubular beam.

Keywords: tubular beam; I-beam; hydraulic beam; liquid filler; cavity

To cite this article:

Popov IP. Beam with increased bearing capacity for bridge span structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):577–586.
doi: 10.17816/transsyst635951

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Вместе с тем, из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используются трубчатые балки.

Сравнение этих двух видов балок по несущей способности следует проводить при условии их равной массы. Для этой цели хорошо подойдет двутавр по ГОСТу Р 57837-2017, масса погонного метра которого составляет 194 кг и труба по ГОСТу 33228-2015, масса погонного метра которой тоже составляет 194 кг.

Осевой момент сопротивления указанного двутавра равен

$$^{l-b}W_x = 5625 \text{ см}^3.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы –

$$^pW_x = 2950 \text{ см}^3.$$

При этом

$$\frac{^{l-b}W_x}{^pW_x} = \frac{5625}{2950} \approx 1,9.$$

Таким образом, несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой.

В настоящее время появились патенты [1–3] и журнальные публикации [4–9] о трубобетонных балках, в частности, с преднапряженной нижней частью бетонного ядра. Стальная труба в таких балках играет роль экзoарматуры. Несущая способность трубобетонных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

Целью настоящей работы является повышение несущей способности трубчатых балок, не имея в виду составления конкуренции двутавровым и трубобетонным балкам, а исключительно для расширения ассортимента строительных конструкций и повышения их эксплуатационных свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках настоящего исследования используется методика геометрической оптимизации и мысленного эксперимента.

Идея использовать жидкий наполнитель для трубчатой балки опирается на известное свойство жидкости – ее практическую несжимаемость.

Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, обладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга. Этому условию соответствует круглая труба.

Трубчатая балка с жидким наполнителем (далее – гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью [10].

При нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность стремится деформироваться. Следовательно, внутренний объем трубы стремится к уменьшению. Вместе с тем, поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что, в свою очередь, препятствует деформации трубы.

Если рассмотреть гидравлическую балку, например, прямоугольного сечения, то при нагружении и соответствующем повышении давления жидкость будет стремиться деформировать стенки, вследствие чего прямоугольный профиль будет стремиться трансформироваться в круглый, а площадь профиля будет стремиться к увеличению. Это может привести к недопустимому прогибу балки.

Другими словами, в гидравлической балке прямоугольного сечения уменьшение внутреннего объема, вызванного прогибом, компенсируется увеличением объема, вызванного трансформацией профиля (суммарный объем несжимаемой жидкости остается неизменным). И чем больше прямоугольный профиль будет трансформироваться в круглый, тем больше будет прогиб.

У круглой трубы нет такого «резерва» и возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно, нет и подобного «резерва» увеличения внутреннего объема. Таким образом, исключена и возможность уменьшения внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости изменяться не может. В идеализированном варианте прогиб круглой гидравлической балки исключается.

Наглядной демонстрацией идеи гидравлической балки может служить простой пример из бытовой практики. Если пустой расправленный матерчатый мешок (аналог балки) положить на два стула (аналог опор),

то он под действием собственного веса прогнется и провалится между стульями.

Если этот же мешок плотно заполнить, например, керамзитом и завязать его, то он не только не провалится между стульями, но может выдержать дополнительную существенную нагрузку.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть при сверхпредельном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), приводящем к выводу ее из строя, пластической деформации подвергается часть поверхности трубы, равная s . Вся площадь поверхности трубы равна S . Сила нагружения равна F^* (сила – сосредоточенная, приложена к середине балки под прямым углом к ее оси).

В самом первом приближении, достаточном для предварительной оценки, предельное напряжение в деформированных участках поверхности трубы равно

$$\sigma^* = \frac{F^*}{s}.$$

В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. (Это происходит в соответствии с законом Паскаля – давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях.) При этом давление на внутреннюю поверхность трубы, не принимая во внимание площадь концевых заглушек (ввиду грубости приближений), равно

$$p = \frac{F^*}{S}.$$

Из этого очевидным образом следует, что

$$q = \frac{\sigma^*}{p} = \frac{S}{s}.$$

Разумеется, напряжение и давление – это не одно и то же, но они, по крайней мере, имеют одинаковую размерность, поэтому (из их сравнения) *в самом первом приближении* несущая способность гидравлической балки выше, чем у трубчатой в q раз.

Правомерность последней формулы вытекает из того, что в случае пустой трубы под действием внешней сверхпредельной нагрузки

разрушается часть поверхности (площадью s), а в случае гидравлической балки – вся поверхность (S), для чего сверхпредельная нагрузка во втором случае должна быть выше как раз в соответствии с последней формулой.

По некоторым экспертным оценкам при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается порядка десяти процентов поверхности трубы, или

$$q \in 10.$$

Пусть

$$q \approx 10.$$

Это означает, что несущая способность гидравлической балки примерно в десять раз выше, чем у трубчатой.

И примерно в пять раз выше, чем у двутаровой.

В случае плоских концевых заглушек места их сварки с трубой являются сильным концентратором напряжений.

В связи с этим и из соображений геометрической оптимизации наилучшей формой концевых заглушек является полусфера.

Полости соседних гидравлических балок в силовой конструкции, например, в пролетном строении моста могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков). Это позволяет равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Действительно, суммарная «рабочая» площадь всех гидравлических (сообщающихся) балок увеличивается кратно количеству балок и давление в балках становится равным

$$p = \frac{F}{nS}, \quad (1)$$

где n – количество сообщающихся гидравлических балок.

Соответственно, в n раз увеличивается несущая способность.

В качестве жидкого наполнителя гидравлических балок во многих случаях следует использовать незамерзающие жидкости.

В целях экономии незамерзающей жидкости внутренние полости гидравлических балок могут частично заполняться твердым дисперсным материалом, например, керамическим ломом, щебнем и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [11–13]. В этом же состоит привлекательность и рассмотренной гидравлической балки.

Приведенные выше расчеты несущей способности являются грубым приближением.

В случае практического использования гидравлических балок потребуются более обстоятельные инженерные исследования, включая учет площади поверхности концевых заглушек, учет различий между давлением и напряжением (например, смятия), учет упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов.

При этом, полученная выше оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой и в десятикратном по сравнению с трубчатой может быть скорректирована как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок можно добиться несопоставимого повышения несущей способности пролетных конструкций [14, 15] (в соответствии с формулой (1)).

Преимущество гидравлической балки над всеми другими типами балок состоит в том, что в отличие от них у гидравлической балки «работает» (в одинаковой мере) весь материал, из которого она изготовлена.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The author declare that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ 2675273 / 18.12.2018 Бюл. № 35. Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., и др. Трубобетонная балка. EDN: BQRXVM
2. Патент РФ 2702444 / 08.10.2019 Бюл. № 28. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., и др. Пролетное трубобетонное строение моста. EDN: BZRSXK
3. Патент РФ 2739271 / 22.12.2020, Бюл. № 36. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., и др. Битрубобетонная балка. EDN: ODMDNT
4. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Применение трубобетона в транспортном строительстве // Дорожная держава. 2019. № 90. С. 74–80.
5. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Малые мосты на трубобетонных элементах – технологический прорыв в нацпроекте

- «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (Ч. 1) // Дорожная держава. 2019. № 91. С. 34–39.
6. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Овчинников И.Г., и др. Малые мосты на трубобетонных элементах – технологический прорыв в нацпроекте «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (Ч. 2) // Дорожная держава. 2019. № 92. С. 54–60.
 7. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Моисеев О.Ю., и др. Упорядочение положения фибры в ядре трубобетонной балки // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2019. № 2 (12). С. 56–65. EDN: IYYSRR
 8. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Моисеев О.Ю., и др. Трубобетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре // Естественные и технические науки. 2019. № 8. С. 189–195. EDN: LBFLZD doi: 10.25633/ETN.2019.08.08
 9. Овчинников И.Г., Парышев Д.Н., Ильяков А.В., и др. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2019. № 4. С. 58–66. doi: 10.15593/24111678/2019.04.07
 10. Патент РФ 2724653 / 25.06.2020. Бюл. № 21. Парышев Д.Н., Ильяков А.В., Копырин В.И., и др. Гидравлическая балка. EDN: ZDVEMW
 11. Козунова О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 1 (300). С. 37–46. doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46
 12. Дёминов П.Д. Вероятностные параметры жесткости железобетонной балки, лежащей на стохастически неоднородном основании // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 12–21. doi: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-12-21
 13. Кумпяк О.Г., Галютдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 81–97. doi: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97
 14. Петрушенко И.А., Аверченко Г.А. Использование бистальных элементов в пролетных строениях мостов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 5–15. EDN: HHLZQV doi: 10.17816/transsyst2022815-15
 15. Лунина А.В., Кучерявая Е.В., Аверченко Г.А. Мосты с балками комбинированного сечения из клееной древесины и железобетона // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 188–199. EDN: DXKRRF doi: 10.17816/transsyst625423

REFERENCES

1. Patent RUS 2675273 / 18.12.2018. Bull. No. 35. Paryshev DN, Kopyrin VI, Moiseev OYu, et al. Pipe-concrete beam. (In Russ.) EDN: BQRXVM
2. Patent RUS 2702444 / 08.10.2019. Bull. No. 28. Paryshev DN, Iltayakov AV, Kopyrin VI, et al. Span pipe-concrete structure of a bridge. (In Russ.) EDN: BZRSXX

3. Patent RUS 2739271 / 22.12.2020. Bull. No. 36. Paryshev DN, Iltyakov AV, Kopyrin VI, et al. Bituminous concrete beam. (In Russ.) EDN: ODMDNT
4. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Application of reinforced concrete in transport construction. *Road State*. 2019;90:74–80. (In Russ.)
5. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Small bridges on pipe-concrete elements – a technological breakthrough in the national project “Safe and high-quality highways” (Part 1). *Road State*. 2019;91:34–39. (In Russ.)
6. Paryshev DN, Iltyakov AV, Ovchinnikov IG, et al. Small bridges on pipe-concrete elements – a technological breakthrough in the national project “Safe and high-quality highways” (Part 2). *Road State*. 2019;92:54–60. (In Russ.)
7. Paryshev DN, Iltyakov AV, Moiseev OYu, et al. Ordering the position of fibers in the core of a reinforced concrete beam. *Transport and mechanical engineering of Western Siberia*. 2019;2(12):56–65. (In Russ.) EDN: IYYSRR
8. Paryshev DN, Iltyakov AV, Moiseev OYu, et al. Ordering the position of fibers in the core of a reinforced concrete beam. *Transport and mechanical engineering of Western Siberia*. 2019;8:189–195. (In Russ.) EDN: LBFLZD doi: 10.25633/ETN.2019.08.08
9. Ovchinnikov IG, Paryshev DN, Iltyakov AV, et al. Increasing the load-bearing capacity of a reinforced concrete beam. *Transport. Transport structures. Ecology*. 2019;4:58–66. (In Russ.) doi: 10.15593/24111678/2019.04.07
10. Patent RUS 2724653 / 06.25.2020. Bull. No. 21. Paryshev DN, Iltyakov AV, Kopyrin VI, et al. Hydraulic beam. (In Russ.) EDN: ZDVEMW
11. Kozunova OV. Nonlinear calculation of a reinforced concrete beam on an elastic foundation using the “rigidity-curvature” relationship. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2022;1(300):37–46. (In Russ.) doi: 10.37538/0039-2383.2022.1.37.46
12. Deminov PD. Probabilistic parameters of the rigidity of a reinforced concrete beam lying on a stochastically inhomogeneous foundation. *Construction and reconstruction*. 2022;6(104):12–21. (In Russ.) doi: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-12-21
13. Kumpyak OG, Galyautdinov DR. Method of calculating reinforced concrete beams with thrust on flexible supports under short-term dynamic loading. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022;24(5):81–97. (In Russ.) doi: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97
14. Petrushenko IA, Averchenko GA. Use of bisteel elements in bridge spans. *Modern transportation systems and technologies*. 2022;8(1):5–15. (In Russ.) EDN: HHLZQV doi: 10.17816/transsyst2022815-15
15. Lunina AV, Kucheryavaya EV, Averchenko GA. Bridges with beams of combined cross-section made of glued laminated timber and reinforced concrete. *Modern transportation systems and technologies*. 2024;10(2):188–199. (In Russ.) EDN: DXKRRF doi: 10.17816/transsyst625423

Сведения об авторе:

Попов Игорь Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики;
eLibrary SPIN: 9668-2780; ORCID: 0000-0001-8683-0387;
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Information about the author:

Igor P. Popov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics
eLibrary SPIN: 9668-2780; ORCID: 0000-0001-8683-0387;
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

<https://doi.org/10.17816/transsyst636724>

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, А.А. Чехова,

Л.Л. Замшина, Н.А. Трубицина

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПУСКА В ХОД ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Обоснование. Линейные асинхронные двигатели в сочетании с электромагнитным подвесом перспективны для тягового привода пассажирского, грузового и городского магнитолевитационного транспорта.

Цель. Изучение особенностей пуска тягового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

Материалы и методы. Аналитическим путем установлена зависимость сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя от скольжения, позволяющая выбирать и оптимизировать пусковые режимы работы двигателя.

Результаты. Полученна возможность определения сопротивления обмотки вторичного элемента линейного двигателя для выбора времени разгона магнитолевитационного транспорта в зависимости от его номинальной скорости движения и силы инерции высокоскоростного экипажа.

Заключение. Результаты исследования позволяют оптимизировать пусковые режимы линейного асинхронного двигателя путем определения способа регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки его вторичного элемента.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель; магнитолевитационный транспорт; короткозамкнутая обмотка вторичного элемента; регулируемое сопротивление обмотки вторичного элемента; оптимизация пусковых режимов.

Как цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. К вопросу об оптимизации пуска в ход линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10. № 4. С. 587–597. doi: 10.17816/transsyst636724

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Rolling stock of railways, train traction and electrification

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, A.A. Chekhov,

L.L. Zamchin, N.A. Trubitsina

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

ON THE QUESTION OF OPTIMIZING THE START-UP OF A LINEAR INDUCTION MOTOR WITH AN ADJUSTABLE RESISTANCE OF THE SHORT-CIRCUITED WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT

Background. Linear induction motors with electromagnetic suspension are promising for traction drives in passenger, freight, and urban magnetic-levitation transport.

Aim: To study the starting process of a traction linear induction motor with adjustable resistance in the short-circuited winding of its secondary element.

Materials and methods. The resistance of the short-circuited winding in the secondary element was analytically modeled as a function of slip, allowing the selection and optimization of the motor's starting modes.

Results. The study identified the optimal resistance of the winding in the secondary element of the linear motor, allowing for fine-tuning the acceleration time of magnetic-levitation transport vehicles based on their nominal speed and the inertia force of the high-speed vehicle.

Conclusion. The research results provide a method to optimize the starting modes of a linear induction motor. This is achieved by regulating the resistance of the short-circuited winding in its secondary element.

Keywords: linear induction motor; magnetic-levitation transport; short-circuited winding of the secondary element; adjustable resistance of the winding of the secondary element; optimization of starting modes.

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, Zamshina LL, Trubitsina NA. On the question of optimizing the start-up of a linear induction motor with an adjustable resistance of the short-circuited winding of the secondary element. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):587–597. doi: 10.17816/transsyst636724

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная система России в перспективе будет дополнена магнитолевитационным транспортом (МЛТ), предназначенным для пассажирских и грузовых перевозок. Магнитолевитационный транспорт по своей сути является инновационным и его применение предполагает появление новых технологий и технических решений на уровне изобретений. В области создания и исследования систем МЛТ работают многие научные коллективы. Значительных результатов в области разработки и изучения магнитолевитационных транспортных систем достигли российские инженеры и ученые [1–7]. Магнитолевитационный транспорт содержит ряд главных элементов (систем): устройство для магнитного подвеса преобразователь напряжения и частоты, линейный тяговый двигатель и устройства для боковой стабилизации и стабилизации воздушного зазора. Одним из наиболее перспективных вариантов представляется применение для тягового привода магнитолевитационного транспорта линейного асинхронного двигателя (ЛАД) простого по конструкции и надежного в эксплуатации. В Ростовском государственном университете путей сообщения были впервые созданы линейные асинхронные двигатели с регулируемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток вторичных элементов (ВЭ) [8]. Линейные асинхронные двигатели с изменяемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток вторичных элементов имеют характеристики, во многом сходные с характеристиками асинхронных машин с фазными обмотками роторов [8].

В работе приведены результаты исследования особенностей пускового режима тягового линейного асинхронного двигателя и определения способа регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ для получения оптимальной и оптимизированной пусковых характеристик магнитолевитационного транспорта.

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА В ХОД РЕГУЛИРУЕМОГО ЛАД

Регулируемый линейный асинхронный двигатель содержит короткозамкнутую обмотку, размещенную в пазах сердечника вторичного элемента и состоящую из электропроводящих стержней. По бокам стержни обмотки вторичного элемента закорочены общей электропроводящей шиной, а с противоположной стороны – замыкающим элементом. Замыкающий элемент в наиболее простом варианте выполнения состоит из двух частей: электропроводящей и изоляционной. Замыкающий

элемент может иметь различные модификации исполнения и обеспечивать возможность, например, вращения вокруг своей горизонтальной оси или же реализовывать вращательно поступательное перемещение с целью регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Кроме того, Разработаны конструкции линейных асинхронных двигателей, у которых замыкающий элемент способен перемещаться в вертикальном направлении или совершать вертикально поступательное движение для изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД. Конструкции стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента могут быть различными, например, состоять из нескольких изолированных проводников, размещенных в пазе сердечника ВЭ параллельно друг другу в вертикальном или горизонтальном направлениях. Как вариант, каждый стержень обмотки ВЭ может быть выполнен в виде одного проводника, полностью занимающего весь паз [8]. Перемещение замыкающего элемента приводит к изменению сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ, что используется для регулирования скорости движения ЛАД и улучшения его пусковых характеристик.

Вопросы исследования пусковых режимов линейных асинхронных двигателей с регулируемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток вторичных элементов являются важными, результаты их изучения представлены в [9, 10].

Вариационная задача минимизации времени пуска и уменьшения потерь мощности регулируемого ЛАД при изменении активного сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента сводится к определению функции $r'_2(s)$, доставляющей минимум функционалу, определенному путем преобразований соотношения, полученного в [11]

$$t_n = T_{эм} \int_{s_n}^1 \frac{s \left[\left(r_1 + r'_2(s) \right)^2 + x_k^2(s) \right] ds}{c_m \cdot r'_2(s) - F(s) \cdot s \left[\left(r_1 + r'_2(s) \right)^2 + x_k^2(s) \right]}, \quad (1)$$

где t_n – время пуска; c ; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени, зависящая от силы инерции электропривода (экипажа МЛТ); c ; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки индуктора, Ом; s_n – номинальное скольжение ЛАД; о.е.; s – скольжение; о.е.; $r'_2(s)$ – приведенное к индуктору активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ; Ом; $x_k(s)$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания ЛАД; Ом.; $F_c(s)$ – механическое усилие инерции электропривода; Н;

c_m — коэффициент, зависящий от фазного напряжения индуктора и параметров короткозамкнутой обмотки ВЭ.

Согласно условию Эйлера [12], функция $r'_2(s)$, доставляющая минимум функционалу (1), должна удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial}{\partial r'_2(s)} \left(\frac{s \left[\left(r_1 + \frac{r'_2(s)}{s} \right)^2 + x_k^2(s) \right]}{c_m \cdot r'_2(s) - F_c(s) \cdot s \left[\left(r_1 + \frac{r'_2(s)}{s} \right)^2 + x_k^2(s) \right]} \right) = 0 \quad (2)$$

или, в соответствии с [13],

$$\frac{c_m (r'_2(s))^2}{s} - c_m \cdot s \cdot r_1^2 - c_m \cdot s \cdot x_k^2(s) = 0. \quad (3)$$

Решая (3) относительно $r'_2(s)$, получим

$$r'_2(s) = s \sqrt{r_1^2 + x_k^2(s)}. \quad (4)$$

Зависимость (4) обеспечивает абсолютную минимизацию времени разгона машины при включении тягового линейного асинхронного двигателя в случае плавного регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки его вторичного элемента.

В качестве примера график этой функции для регулируемого ЛАД с номинальной мощностью 60 кВт, с числом полюсов $2p = 4$, и номинальной скоростью движения $v_n = 36$ м/с при силе инерции в 10 раз, превышающей силу инерции экипажа магнитолевитационного транспорта, представлен на Рис. 1. Время пуска данного регулируемого линейного асинхронного двигателя, определенное расчетным путем, при плавном изменении сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ составило 2,74 с.

Плавное регулирование сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД возможно обеспечить только при использовании сплошных электропроводящих стержней, полностью занимающих пазы сердечника вторичного элемента.

Конструктивное выполнение стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя обеспечивает

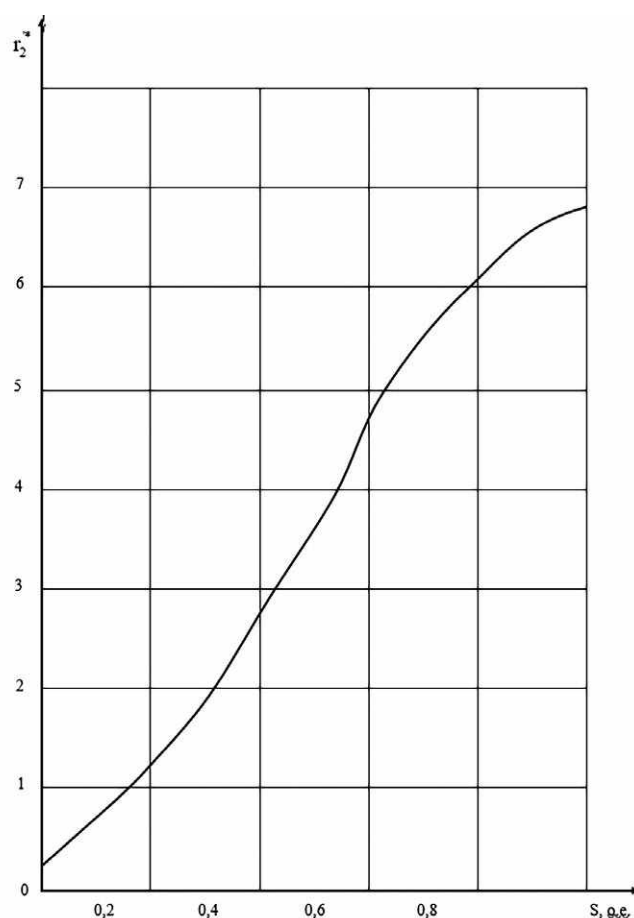


Рис. 1. Оптимальная (гладкая) зависимость сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД от скольжения

Fig. 1. Optimal (smooth) dependence of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of the LIM on slip

и ступенчатое изменение величины сопротивления обмотки вторичного элемента при пуске двигателя в ход. Ступенчатое изменение сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД достигается как замыканием отдельных проводников стержней подвижным замыкающим контактным элементом, так и при использовании электронного коммутатора. При дискретном регулировании возникает задача определения значений скольжений, при которых должны поочередно переключаться ступени сопротивлений стержней обмотки вторичного элемента ЛАД.

Определим в общем виде для заданной оптимальной зависимости $r_2'(s)$, представленной кривой на Рис. 1, и заданных « n » ступеней переключения активного сопротивления обмотки вторичного элемента ЛАД. Определим значения r_{2i}' , соответствующие « n » ступеням регулирования, и величины скольжений s_{nki} , при которых должно

происходить переключение ступеней сопротивлений (линия 2, Рис. 2). Для этого запишем соотношение для каждой из ступеней регулирования

$$(s_{i-1}, s_i) = \left[\left(r_2' \right)^{-1} \left(r_{nki-1} \right), r_2' \left(r_{2nki} \right) \right],$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n-1, n$ и где положено $s_0 = r_2' \left(r_{2i} \right)$ и получим систему равенств

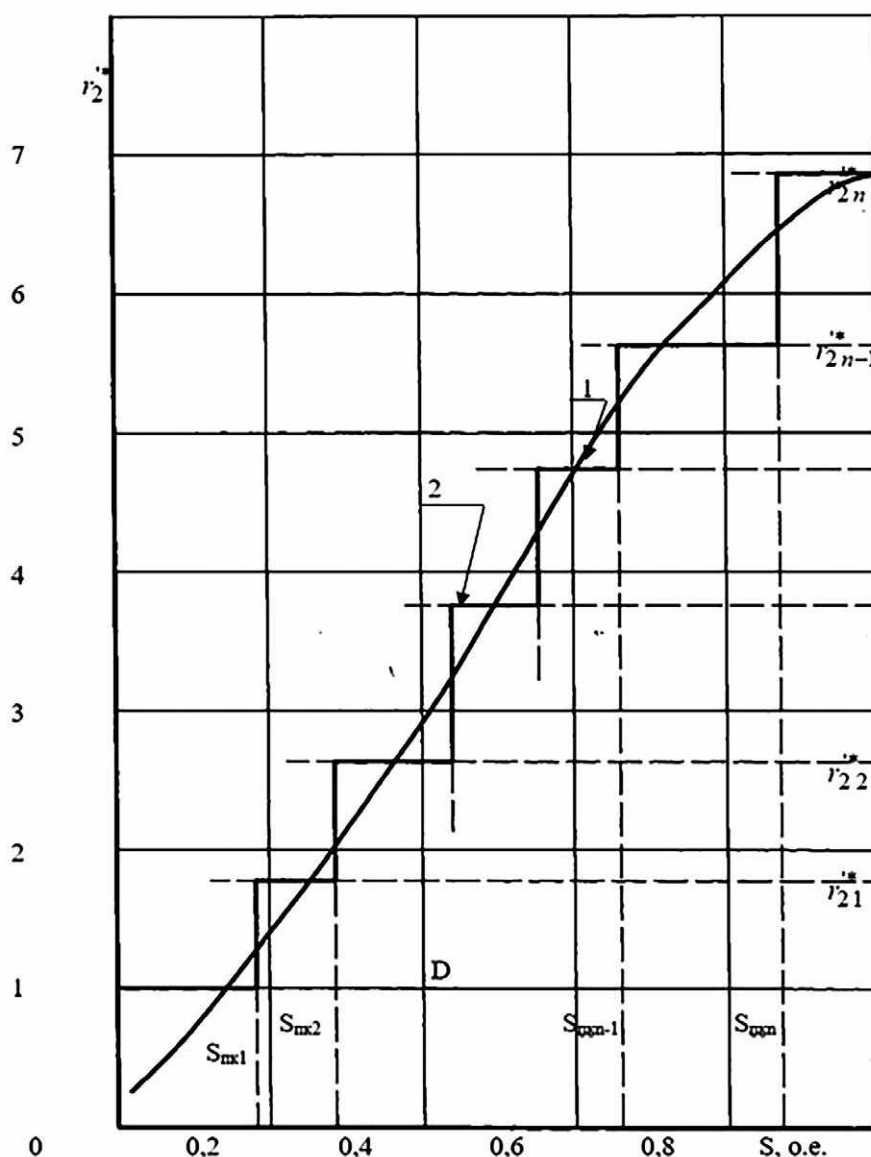


Рис. 2. Оптимальная гладкая – 1 и оптимизированная (многоступенчатая) – 2 зависимости сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД от скольжения

Fig. 2. Optimal smooth – 1 and optimized (multi-stage) – 2 dependences of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of the LIM on slip

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{n\kappa 1} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (1 + r_{n\kappa 1}') \right); \\ s_{n\kappa 2} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (r_{n\kappa 1}' + r_{n\kappa 2}') \right); \\ \dots\dots\dots \\ s_{n\kappa n} = (r_2')^{-1} \left(\frac{1}{2} (r_{n\kappa n-1}' + r_{n\kappa n}') \right). \end{array} \right. \quad (5)$$

Система равенств (5) определяет ступенчатую оптимизированную зависимость функции $r_2'(s)$. Например, при $n = 7$ рассчитанное на ЭВМ время пуска (разгона) регулируемого ЛАД, мощностью 60 кВт, составило $t_n = 2,92$ с, что превышает на 6,6% время при оптимальном (Рис. 1), плавном изменении $r_2'(s)$. Для обеспечения комфорта пассажиров магнитолевитационного транспорта нужен плавный разгон транспортного экипажа при пониженном значении пускового усилия. Для достижения этой цели по полученным соотношениям можно рассчитать необходимые значения сопротивлений каждой ступени при регулировании параметров обмотки вторичного элемента в процессе пуска тягового ЛАД в ход.

В заключении можно сделать вывод о том, что для определения параметров ступенчатой зависимости $r_2'(s)$, при которой имеет место пуск с заданным временем разгона магнитолевитационного транспорта с тяговым линейным асинхронным двигателем с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, можно использовать полученные теоретическим путем соотношения.

ВЫВОДЫ

Определена оптимальная (гладкая) зависимость активного сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, регулируемого ЛАД от скольжения, при которой время пуска будет минимальным.

Конструкция короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя позволяет получить ступенчатую зависимость $r_2'(s)$, близкую к оптимальной.

Расчетные исследования показали, что для увеличения пускового тягового усилия и его плавного изменения в широких пределах у регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента стержни обмотки следует выполнять

сплошными и перемещать замыкающий элемент в продольном направлении (по ширине паза).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Ростовского государственного университета путей сообщения.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of the Rostov State University of Transport.

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. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Талашкин Г.Н. Транспорт на магнитном подвесе. СПб.: ПГУПС, 2011.
3. Антонова Ю.Ф., Зайцева А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
4. Зайцев А.А., Морозова Е.И., Талашкин Г.Н. и др. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. СПб.: НП-Принт, 2015.
5. Зайцев А.А., Соколова Я.В. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 12. С. 62–65. EDN: BYVZPT
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. 2014. № 5. С. 69–73. EDN TDGFZB
7. Антонов Ю. Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. 2014. № 4 (41). С. 5–15. EDN: TDWZWN
8. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель // Электротехника. 2004. № 12. С. 31–34.
9. Куценко В.В. Тягово-тормозные устройства на основе регулируемых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного транспорта : дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2011. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005405721>

10. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины. Теория, расчет, элементы проектирования. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Лаврентьев М.А., Люстерник Л.А. Курс вариационного исчисления. 2-е изд. М.: ГИТТЛ, 1950.
12. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Высш.школа, 1965.

REFERENCES

1. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic Levitation Transport Technology*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
2. Zaitsev AA, Sokolova IaV, Talashkin GN. *Magnetic levitation transport*. 2nd ed. St. Petersburg: PGUPS; 2011. (In Russ.)
3. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic Levitation Transport: Scientific Problems and Technical Solutions*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
4. Zaitsev AA, Morozova EI, Talashkin GN, Sokolova YaV. *Magnetic levitation transport in the unified transport system of the country*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. (In Russ.)
5. Zaitsev AA, Sokolova YaV. On the current stage of development of magnetic levitation transport. *Railway transport*. 2016;12:62–65. (In Russ.) EDN: BYVZPT
6. Zaitsev AA. Magnetic levitation transport systems and technologies. *Railway transport*. 2014;5:69–73. (In Russ.) EDN TDGFZB
7. Antonov JF, Zaitsev AA, Morozova EI. Study of magnetodynamic levitation and electrodynamic braking of a cargo transport platform. *Proceedings of Petersburg state transport University*. 2014;4(41):5–15. (In Russ.) EDN: TDWZWN
8. Solomin AV. Adjustable linear asynchronous motor. *Electrical engineering*. 2004;12:31–34. (In Russ.)
9. Kutsenko VV. Traction and braking devices based on controlled linear asynchronous motors for high-speed transport [dissertation]. Rostov-on-Don; 2011. Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005405721>. (In Russ.)
10. Dombrovsky VV, Zaichik VM. *Asynchronous machines. Theory, calculation, design elements*. Leningrad: Energoatomizdat; 1990. (In Russ.)
11. Lavrentiev M.A., Lyusternik L.A. *Course of calculus of variations*. 2nd ed. Moscow: GITTL; 1950. (In Russ.)
12. Kurosh A.G. *Course of Higher Algebra*. Moscow: Vyssh.shkola; 1965. (In Russ.)
- 13.

Сведения об авторах:

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

Чехова Анастасия Алановна, аспирант;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: bichilovaa@mail.ru

Замшина Лариса Леонидовна, кандидат технических наук; доцент;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Трубицина Надежда Анатольевна, кандидат технических наук; доцент;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

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

Anastasia A. Chekhova, Postgraduate student;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: bichilovaa@mail.ru

Larisa L. Zamshina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8703-1347; ORCID: 0000-0001-5374-9443;

E-mail: ema@rgups.ru

Nadezhda A. Trubitsina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 4192-0487; ORCID: 0000-0001-6640-8306;

E-mail: ema@rgups.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst635921>

© И.И. Вашлаев^{1, 2}, А.Г. Михайлов^{1, 2}, А.Е. Зуев¹

¹ Институт химии и химической технологии – Обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (Красноярск, Россия)

² Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУЗОПОТОКОВ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ВЕЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Обоснование. Приведена методика аналитического определения оптимального распределения грузопотоков при перевозке горной массы автомобильным транспортом с учетом приведенного расстояния транспортирования. В качестве параметра, по которому производится оптимизация, принята транспортная работа – произведение объема горной массы на расстояние транспортирования. Суть метода заключается в изучении различных вариантов грузопотоков при отработке клиновидных блоков, определения транспортной работы и оптимизации ее на основе известных математических методов. С этой целью используется метод определения экстремума функции. В качестве альтернативного (дополнительного) метода можно использовать графический метод.

Цель. Снижение транспортных расходов на вывозку горной массы путем оптимизации грузопотоков автомобильного транспорта.

Методы. Аналитические методы, математический метод нахождения экстремума, методы математической статистики.

Результаты. Разработана методика оптимизации грузопотоков горной массы при веерной разработке месторождения.

Заключение. Результаты исследования позволяют обосновать оптимальный вариант распределения грузопотоков горной массы при веерной разработке месторождения. Предложенная методика оптимизации может быть использована и для других систем разработки, когда имеется несколько трасс транспортирования с одного уступа.

Ключевые слова: Приведенное расстояние транспортирования; клиновидный блок; грузопоток; оптимизация; транспортная работа; веерное подвигание; фронт работ.

Как цитировать:

Вашлаев И.И. Михайлов А.Г., Зуев А.Е. Оптимизация грузопотоков горной массы при веерной отработке месторождения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 598–617. doi: 10.17816/transsyst635921

Исследование выполнено при поддержке проекта №. FWES-2021-0014
Фундаментальные исследования ИХХТ СО РАН

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

© I.I. Vashlaev^{1, 2}, A.G. Mikhailov^{1, 2}, A.E. Zuev¹

¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology – Separate Division of the Federal State Budgetary Institution of the Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center” SB RAS (Krasnoyarsk, Russia)

² Siberian Federal University
(Krasnoyarsk, Russia)

OPTIMIZATION OF MINE MASS CARGO FLOWS DURING FAN MINING OF THE FIELD

Background. A method is presented for analytically determining the optimal distribution of cargo flows during rock mass transportation by road, factoring in the given transportation distance. The key parameter for optimization is transport work, defined as the product of the volume of the rock mass and the transportation distance. This method involves exploring various cargo flow scenarios when developing wedge-shaped blocks, determining the transport work and optimizing it based on well-known mathematical methods. For this purpose, the extremum of the function is determined. As an alternative (additional), you can use the graphical method.

Aim. Reduce transportation costs for rock mass removal by optimizing road transport cargo flows.

Methods. Analytical methods, mathematical approaches to finding the extremum, methods of mathematical statistics.

Results. A methodology was developed to optimize rock mass cargo flows during the fan-shaped development of a field.

Conclusion. This study provides a foundation for determining the optimal distribution of rock cargo flows in fan-shaped field development. The proposed optimization technique can be used in other development systems with multiple transportation routes from one ledge.

Keywords: Reduced transportation distance; wedge-shaped block; cargo flow; optimization; transport work; fan propulsion; work front.

To cite this article:

Vashlaev II, Mikhailov AG, Zuev AT. Optimization of mine mass cargo flows during fan mining of the field. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):598–617. doi: 10.17816/transsyst635921

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности добычи полезных ископаемых неразрывно связано со снижением расходов на транспортирование горных пород. Снижение затрат на транспортирование является одним из основных резервов повышения эффективности добычи полезных ископаемых. Требуется своего изучения и оптимизация транспортных работ при веерной системе разработки месторождений. Так веерная центральная система разработки применяется при округлой и близкой к треугольной конфигурации карьерного поля, позволяющей удобно расположить постоянный поворотный пункт [1]. Изучению параметров веерного подвигания фронта горных работ посвящены работы [2–8].

В работах [2, 3] показана возможность весьма значительного снижения себестоимости транспортных работ в зависимости от порядка отработки клиновидных блоков и перемещения вскрышных пород в пределах фронта работ на уступе. Исследование проводилось для условий отработки с горизонтальным уклоном уступа. На практике пластовые месторождения в основном представлены слабонаклонными или наклонными. Поэтому необходимо обоснование порядка отработки клиновидных блоков и оптимизация грузопотоков пород вскрыши с учетом различного уклона фронта работ, полного расстояния транспортирования (от забоя до места разгрузки), качества дорожного полотна каждого участка трассы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ГРУЗОПОТОКОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ПРИ ВЕЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Схема отработки вскрышных пород при веерной системе разработки месторождения представлена на Рис. 1. В технологической схеме в качестве выемочно-погрузочного оборудования приняты экскаваторы типа мехлопата, а транспортирование пород производится автосамосвалами БелАЗ–75145.

В качестве параметра, по которому производится оптимизация, принята транспортная работа – произведение объема горной массы на расстояние транспортирования, так как от нее напрямую зависят денежные затраты на транспортирование и в целом затраты на добычу полезного ископаемого.

Объектом исследования в данной работе является клиновидный блок, схема отработки которого приведена на Рис. 1. Клинovidный

блок разбивается на условные участки, границы которых обозначены пикетами (Рис. 2). Расстояние между пикетами должно быть в пределах 50–100 м, что обеспечивает, по нашему мнению, достаточную точность расчетов. В данной работе количество участков принято равным 30 единицам, расстояние между пикетами равно 100 м. Высота уступа (h) составляет 10 м. Площадь каждого элементарного участка определяется по методике, приведенной в работе [2]. При изучении рассматривается порядок разработки клиновидных блоков экскаваторно-автомобильными комплексами двумя вариантами:

- Вариант 1 – отработка блоков ведется от широкой стороны в направлении узкой (от 30 пикета к 0) (Рис. 2), транспортирование пород производится через левый фланг фронта горных работ;
- Вариант 2 – отработка блоков ведется от узкой стороны в направлении широкой (от 0 пикета к 30) (Рис. 2), транспортирование пород производится через правый фланг фронта горных работ.

Длина транспортирования по варианту 1 составит

$$L_{\text{л}} = l_{\text{би}} + 2l_{\text{сy}} + l_1 + l_{\text{ол}} + l_{\text{со}} + l_{\text{o}}, \text{ м}$$

где $L_{\text{л}}$ – расстояние транспортирования через левый фланг фронта работ, м; $l_{\text{сy}}$ – длина съезда на уступе, м; l_1 – расстояние между съездами, м; $l_{\text{ол}}$ – расстояние от съезда до отвала, м; l_{o2} – длина съезда на отвале, м.

С целью надежной и объективной оценки работы автомобильного транспорта и управления процессом транспортирования множество основных горнотехнических параметров транспортирования следует выразить через интегральный показатель. Таким интегральным показателем является приведенное к горизонтальному эквиваленту расстояние транспортирования горной массы, которое определяется исходя из условия равенства энергий, необходимых для перемещения груза на наклонном и горизонтальном участках. Впервые это было предложено в работах Галкина В.А. и Яковлева В.Л. [9, 10]. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах [11–17].

Длину автомобильной трассы предлагается оценивать формулой [13, 14]:

$$L_{\text{пр}}^{\text{Б}} = L_{\text{пр}} \omega_{\text{o ср}} / \omega_{\text{o Б}}, \text{ м} \quad (1)$$

где $L_{\text{пр}}^{\text{Б}}$ – базовое приведенное расстояние транспортирования, м; $L_{\text{пр}}$ – приведенное расстояние, учитывающее такие параметры как удельное

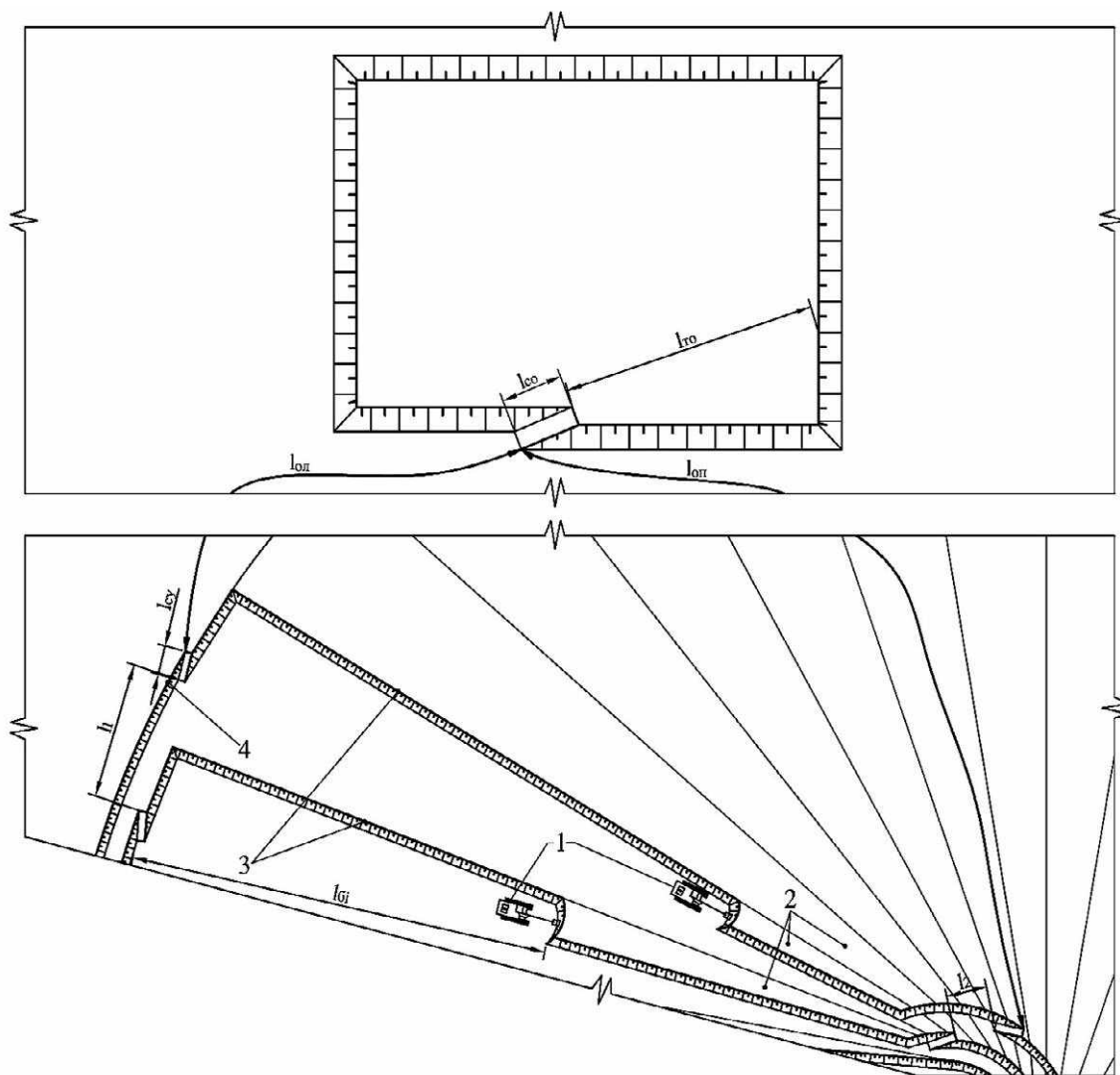


Рис. 1. Технологическая схема разработки вскрышных пород при веерной системе разработки несколькими уступами: 1 – выемочно-погрузочные комплексы циклического действия; 2 – клиновидно-эксплуатационный блок (КЭБ); 3 – линии фронта горных работ на горизонте; $l_{ол}$ – расстояние транспортирования на уступе со стороны левого фланга до съезда отвала; $l_{оп}$ – расстояние транспортирования на уступе со стороны правого фланга до съезда отвала; $l_{сy}$ – длина съезда уступа; $l_{со}$ – длина съезда отвала; l_1 – расстояние между съездами на левом фланге горных работ; l_2 – расстояние между съездами на правом фланге горных работ; $l_{то}$ – расстояние транспортирования от съезда отвала до фронта разгрузки

Fig. 1. Development plan for overburden rocks with a fan system of several ledges: 1 – extraction and loading complexes of cyclic action; 2 – wedge-shaped operational unit (KEB); 3 – the mining front line on the horizon; $l_{ол}$ – the distance of transportation on the ledge from the left flank to the dump exit; $l_{оп}$ – the distance of transportation on the ledge from the right flank to the dump exit; $l_{сy}$ – the length of the ledge exit; $l_{со}$ – the length of the dump exit; l_1 – the distance between the exits on the left flank of mining operations; l_2 – the distance between the exits on the right flank of mining operations; $l_{то}$ – the distance of transportation of the dump exit to the unloading front

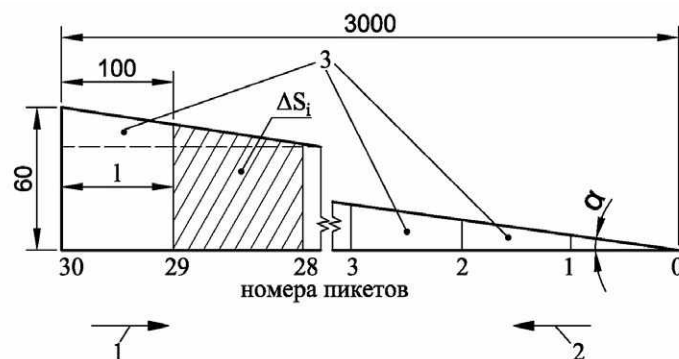


Рис. 2. Схема клиновидного блока в плане: 1 – направление подвигания забоя по варианту 1; 2 – направление подвигания забоя по варианту 2;
3 – элементарные блоки

Fig. 2. Diagram of wedge-shaped block in plan: 1 – direction of face movement according to option 1; 2 – direction of the face movement according to option 2;
3 – elementary blocks

сопротивление движению автосамосвала на элементарных участках трассы, уклон отдельных участков, коэффициент тары автосамосвала и коэффициент использования грузоподъемности, м; $\omega_{0\text{ ср}}$ – средневзвешенное удельное основное сопротивление движению трассы, Н/кН; $\omega_{0б}$ – базовое удельное основное сопротивление движению, Н/кН. Базовое (эталонное) удельное основное сопротивление движению необходимо для сопоставимости транспортной работы при различных средних удельных сопротивлениях отдельных трасс (маршрутов), величина, которой принимается по усмотрению эксперта.

Коэффициенты приведения на подъем груза $\mathcal{E}_п$ и спуск $\mathcal{E}_с$ участка трассы с уклоном i (‰) и удельным основным сопротивлением движению ω_0 , (Н/кН):

- при $i \leq \omega_0$

$$\mathcal{E}_п = \frac{1000K_\Gamma}{\omega_0(K_\Gamma + 2K_T)}, \text{ м/м} \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_с = -\frac{1000K_\Gamma}{\omega_0(K_\Gamma + 2K_T)}, \text{ м/м} \quad (3)$$

- при $i > \omega_0$

$$\mathcal{E}_п = \frac{1000(K_\Gamma + K_T(1 - \frac{\omega_0}{i}))}{\omega_0(K_\Gamma + 2K_T)}, \text{ м/м} \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_c = \frac{1000(K_T - (K_\Gamma + K_T) \frac{\omega_0}{i})}{\omega_0(K_\Gamma + 2K_T)}, \text{ м/м} \quad (5)$$

где K_T – коэффициент тары автосамосвала; K_Γ – коэффициент использования грузоподъемности.

Приведенное расстояние трассы (L_{np}) следует определять на основании формулы (6), исходя из известных параметров

$$L_{np} = \sum_{j=1}^n L_j + 0.001 \sum_{j=1}^n i_j L_j \mathcal{E}_j, \text{ м} \quad (6)$$

где L_j , i_j , $\mathcal{E}_j$ – соответственно фактическая длина, уклон и коэффициент приведения j -го участка трассы ($j=1 \dots n$).

Для сопоставимости трассы с различным дорожным покрытием приводятся к средневзвешенной величине основного удельного сопротивления движению ($\omega_{o \text{ ср}}$)

$$\omega_{o \text{ ср}} = \left(\sum_{j=1}^n \omega_{oj} L_j + 0.001 \sum_{j=1}^n \omega_{oj} i_j L_j \mathcal{E}_j \right) / L_{np}, \text{ Н/кН}, \quad (7)$$

где ω_{oj} – удельное основное сопротивление движению j -го участка трассы, $j=1, n$, Н/кН, а затем приведением к базовому основному удельному сопротивлению движению ($\omega_{об}$)

В данном примере при изучении грузопотоков нами приняты различные горнотехнических условия разработки месторождения:

- горизонтальный уклон уступа;
- уклон в сторону левого фланга 10 %;
- уклон в сторону правого фланга 10 %.

Исходные данные для дорог при отработке горизонтального клиновидного блока по первому и второму вариантам (Рис. 1, 2) приведены в Табл. 1. Фактическое расстояние транспортирования породы по маршруту № 1 от границы начала съезда нижнего уступа на левом фланге до места разгрузки на отвале составляет 4285 м. При транспортировании породы через правый фланг (маршрут № 2) от границы начала съезда нижнего уступа на правом фланге до места разгрузки на отвале фактическое расстояние равно 4362 м.

Необходимо рассчитать следующие параметры транспортных работ: приведенное базовое расстояние транспортирования $L_{при}^B$, м; объем каждого элементарного блока $V_i = \Delta S h$, тыс.м³; транспортная работа по элементарному блоку $V_i L_{при}^B$ тыс.м³·км; кумулятивная транспортная

работа $\sum V_i L_{\text{пр}i}^B$, тыс.м³·км; кумулятивные объёмы $\sum V_i$, тыс.м³ и базовое средневзвешенное расстояние транспортирования $L_{\text{пр}cp}^B$, км. Все расчетные параметры приведены в Табл. 2 и 3.

Таблица 1. Удельные сопротивления качению на элементарных участках дороги по вариантам отработки с горизонтальным клиновидным блоком

Table 1. Rolling resistance at elementary road sections by mining options with horizontal wedge block

Условные обозначения участков дорог	l_{bi}	l_{cy}	l_1	$l_{ол}$	l_2	$l_{оп}$	l_{co}	l_o
Вариант 1								
Длина участка, м	0–3000	143	70	2600	–	–	429	900
i , ‰	0	70	0	0	–	–	70	0
ω , Н/кН	60	40	40	35	–	–	35	70
Вариант 2								
Длина участка, м	0–3000	143	–	–	47	2700	429	900
i , ‰	0	70	–	–	0	0	70	0
ω , Н/кН	60	40	–	–	40	35	35	70

По транспортной работе строятся графики нарастающих объемов в зависимости от порядка отработки блоков (направления грузопотока) (Рис. 3) и по стандартным программам математической статистики вычисляются уравнения регрессии зависимости кумулятивной транспортной работы от порядка отработки блоков. Из графика (Рис. 3) и Табл. 1 и 2, видно, что при отработке клиновидного блока со стороны левого фланга в сторону правого и направлении грузопотока через левый фланг вариант 1 экономичнее варианта 2 на 1407 тыс.м³·км (23,2%). Если принять ориентировочно себестоимость транспортирования 1 т/км равным 4 руб., то при плотности пород 1,6 т/м³ это составит 9005 тыс. руб.

Теперь рассмотрим отработку блоков, при которой грузопотоки направляются через левый и правый фланги (комбинация грузопотоков): горная масса левее i -го пикета вывозится по трассе через левый фланг, а правее его – через правый фланг. Оптимальный вариант грузоперевозок будет при минимальном объеме транспортных работ. В работе [2] было предложено определять оптимальный вариант грузоперевозок при равенстве транспортных работ для различных вариантов. При данном подходе находится значение близкое к оптимальному, но с точки зрения физики процесса и математики не является однозначно оптимальным. Наиболее

простым методом определения оптимальных грузопотоков является графический: строится график зависимости объема транспортных работ от порядка отработки клиновидных блоков (Рис. 4). Из графика видно, что оптимальным является комбинация грузопотоков по 15 пикету. Из Табл.2 видно, что наименьший объем транспортных работ равен 5748,5 тыс.м³·км.

Существует математический метод определения минимума (экстремума) функции кубического уравнения.

1. Найти производную $f'(x)$.
2. Найти критические точки $f'(x) = 0$.
3. Найти вторую производную $f''(x)$.
4. Исследовать знак второй производной в каждой из критических точек. Если при этом вторая производная окажется отрицательной, то функция в такой точке имеет максимум, а если положительной, то – минимум. Если же вторая производная равна нулю, то экстремум надо искать с помощью первой производной.
5. Вычислить значения в точках экстремума.

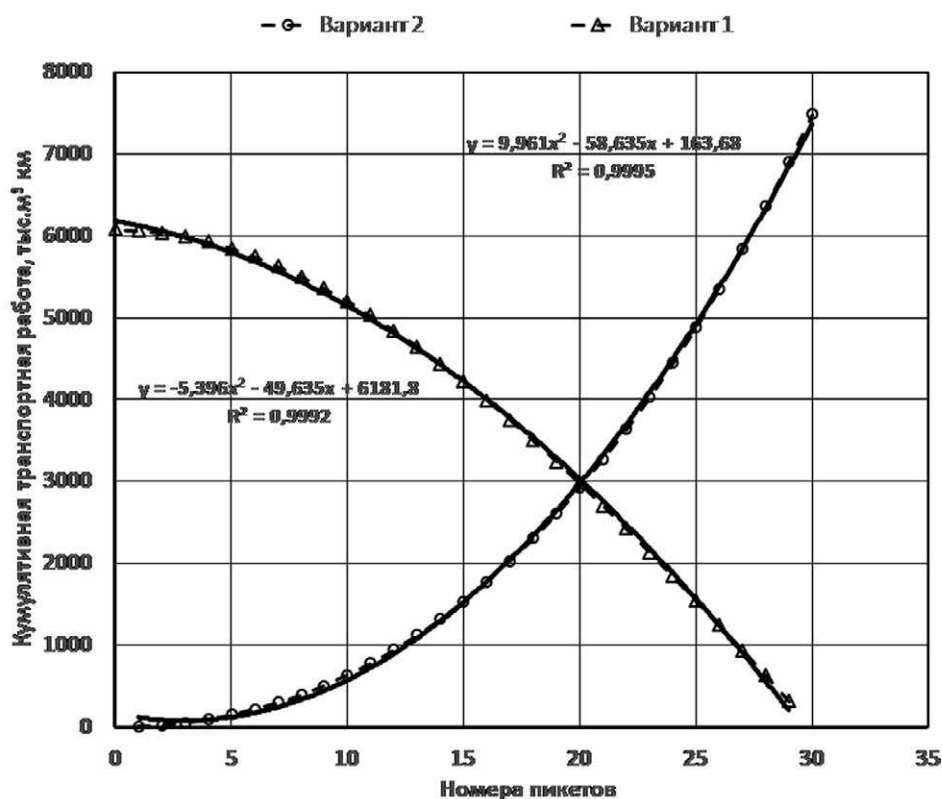


Рис. 3. Изменение нарастающих объемов транспортной работы от порядка отработки элементарных участков и направления грузопотоков

Fig. 3. Change in increasing volumes of transport work from the procedure for working out elementary sections and the direction of cargo flows

Таблица 2. Транспортирование через левый фланг фронта работ (вариант 1)**Table 2.** Transportation through the left flank of the work front (option 1)

№ пикета	Рас- стояние транспор- тирова- ния ($L_{пр i}^B$), м	ΔS_i , тыс. м ²	V_i , тыс. м ³	$V_i L_{пр i}^B$, тыс. м ³ ·км	$\sum V_i L_{пр i}^B$, тыс. м ³ ·км	$\sum V_i$, тыс. м ³	Кумулятивная транспорт- ная работа при комбина- ции грузопотоков, тыс. м ³ ·км
29	5321,0	5,90	59,0	313,94	313,94	59,00	7218,67
28	5471,0	5,70	57,0	311,85	625,79	116,00	6984,11
27	5621,0	5,50	55,0	309,16	934,94	171,00	6774,29
26	5771,0	5,30	53,0	305,86	1240,80	224,00	6587,99
25	5921,0	5,10	51,0	301,97	1542,78	275,00	6424,03
24	6071,0	4,90	49,0	297,48	1840,25	324,00	6281,19
23	6221,0	4,70	47,0	292,39	2132,64	371,00	6158,29
22	6371,0	4,50	45,0	286,70	2419,34	416,00	6054,11
21	6521,0	4,30	43,0	280,40	2699,74	459,00	5967,47
20	6671,0	4,10	41,0	273,51	2973,25	500,00	5897,15
19	6821,0	3,90	39,0	266,02	3239,27	539,00	5841,97
18	6971,0	3,70	37,0	257,93	3497,20	576,00	5800,71
17	7121,0	3,50	35,0	249,24	3746,43	611,00	5772,19
16	7271,0	3,30	33,0	239,94	3986,37	644,00	5755,19
15	7421,0	3,10	31,0	230,05	4216,43	675,00	5748,53
14	7571,0	2,90	29,0	219,56	4435,98	704,00	5750,99
13	7721,0	2,70	27,0	208,47	4644,45	731,00	5761,39
12	7871,0	2,50	25,0	196,78	4841,23	756,00	5778,51
11	8021,0	2,30	23,0	184,48	5025,71	779,00	5801,17
10	8171,0	2,10	21,0	171,59	5197,30	800,00	5828,15
9	8321,0	1,90	19,0	158,10	5355,40	819,00	5858,27
8	8471,0	1,70	17,0	144,01	5499,41	836,00	5890,31
7	8621,0	1,50	15,0	129,32	5628,72	851,00	5923,09
6	8771,0	1,30	13,0	114,02	5742,74	864,00	5955,39
5	8921,0	1,10	11,0	98,13	5840,88	875,00	5986,03
4	9071,0	0,90	9,0	81,64	5922,51	884,00	6013,79
3	9221,0	0,70	7,0	64,55	5987,06	891,00	6037,49
2	9371,0	0,50	5,0	46,85	6033,92	896,00	6055,91
1	9521,0	0,30	3,0	28,56	6062,48	899,00	6067,87
0	9671,0	0,10	1,0	9,67	6072,15	900,00	6072,15

Таблица 3. *Транспортирование через правый фланг фронта работ (вариант 2)***Table 3.** *Transportation through the right flank of the work front (option 2)*

№ пикета	Рас- стояние транспор- тирова- ния ($L_{пр i}^B$), м	ΔS_i , тыс. м ²	V_i , тыс. м ³	$V_i L_{пр i}^B$, тыс. м ³ ·км	$\sum V_i L_{пр i}^B$, тыс. м ³ ·км	$\sum V_i$, тыс. м ³	Кумулятивная транспорт- ная работа при комбина- ции грузопотоков, тыс. м ³ ·км
1	5386,0	0,10	1,0	5,39	5,39	1,00	6067,87
2	5536,0	0,30	3,0	16,61	21,99	4,00	6055,91
3	5686,0	0,50	5,0	28,43	50,42	9,00	6037,49
4	5836,0	0,70	7,0	40,85	91,28	16,00	6013,79
5	5986,0	0,90	9,0	53,87	145,15	25,00	5986,03
6	6136,0	1,10	11,0	67,50	212,65	36,00	5955,39
7	6286,0	1,30	13,0	81,72	294,36	49,00	5923,09
8	6436,0	1,50	15,0	96,54	390,90	64,00	5890,31
9	6586,0	1,70	17,0	111,96	502,87	81,00	5858,27
10	6736,0	1,90	19,0	127,98	630,85	100,00	5828,15
11	6886,0	2,10	21,0	144,61	775,46	121,00	5801,17
12	7036,0	2,30	23,0	161,83	937,28	144,00	5778,51
13	7186,0	2,50	25,0	179,65	1116,93	169,00	5761,39
14	7336,0	2,70	27,0	198,07	1315,01	196,00	5750,99
15	7486,0	2,90	29,0	217,09	1532,10	225,00	5748,53
16	7636,0	3,10	31,0	236,72	1768,82	256,00	5755,19
17	7786,0	3,30	33,0	256,94	2025,75	289,00	5772,19
18	7936,0	3,50	35,0	277,76	2303,51	324,00	5800,71
19	8086,0	3,70	37,0	299,18	2602,70	361,00	5841,97
20	8236,0	3,90	39,0	321,20	2923,90	400,00	5897,15
21	8386,0	4,10	41,0	343,83	3267,73	441,00	5967,47
22	8536,0	4,30	43,0	367,05	3634,77	484,00	6054,11
23	8686,0	4,50	45,0	390,87	4025,64	529,00	6158,29
24	8836,0	4,70	47,0	415,29	4440,94	576,00	6281,19
25	8986,0	4,90	49,0	440,31	4881,25	625,00	6424,03
26	9136,0	5,10	51,0	465,94	5347,19	676,00	6587,99
27	9286,0	5,30	53,0	492,16	5839,34	729,00	6774,29
28	9436,0	5,50	55,0	518,98	6358,32	784,00	6984,11
29	9586,0	5,70	57,0	546,40	6904,73	841,00	7218,67
30	9736,0	5,90	59,0	574,42	7479,15	900,00	7479,15

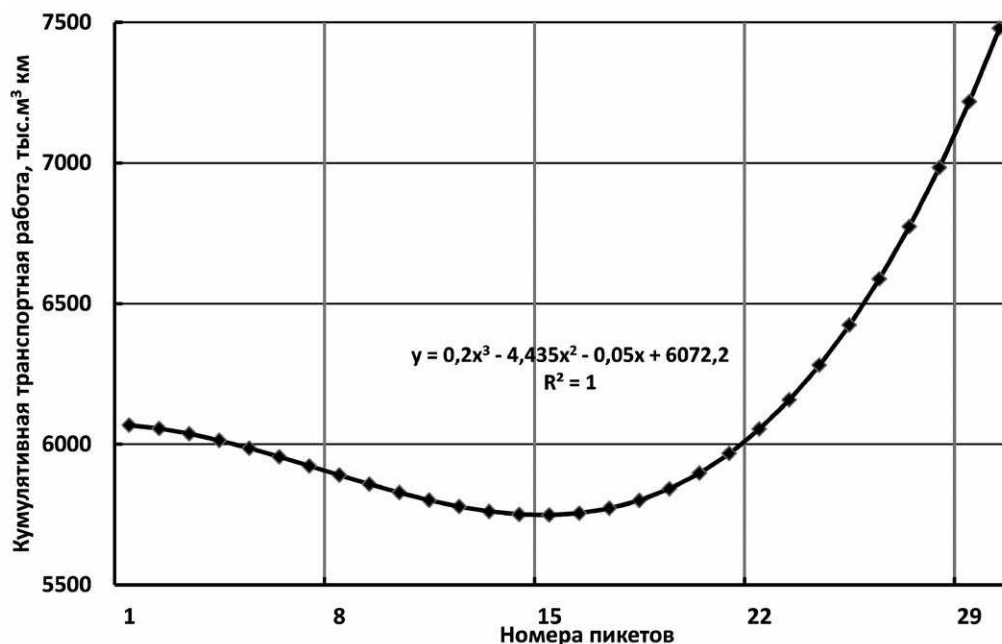


Рис. 4. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с горизонтальной рабочей площадкой

Fig. 4. Dependence of cumulative transport work in case of combined distribution of cargo flows with a horizontal work site

По вышеизложенной методике для рассматриваемого случая

$$y = 0,2x^3 - 4,435x^2 - 0,05x + 6072,2$$

найлены критические точки $x_1=15,21$ и $x_2=30$. Минимум объёма транспортной работы соответствует точке 15,21 и равен 5749 тыс. м³·км, что соответствует и данным Табл. 2 (выделено цветом). Реализация оптимального решения будет выглядеть следующим образом: граница разделения грузопотоков 1521 м ($15,21 \cdot 100$ м) длины блока, левая часть клиновидного блока должна быть вывезена через левый фланг, а правая – через правый.

Представляет интерес для изучения влияние уклона клиновидного блока на объёмы транспортных работ. По аналогии с вышеизложенной методикой рассмотрим параметры транспортных работ с уклоном клиновидного блока 10‰ к левому флангу, а затем к правому.

Расчетные данные при уклоне рабочей площадки в сторону левого фланга фронта работ приведены в Табл. 4 и на их основе построен график кумулятивной транспортной работы при комбинации грузопотоков (Рис. 5). Минимальное значение транспортной работы соответствует точке фронта работ 1382 м, т.е. произошло смещение оптимума в сторону правого фланга

(при горизонтальной рабочей площадке оптимальная точка равна 1521 м от нулевого пикета). Также для варианта 1 произошло незначительное снижение транспортной работы с 6072 тыс. м³·км до 5984 тыс. м³·км (на 88 тыс. м³·км, что соответствует в денежном выражении примерно 560 тыс. руб.) Для варианта 2 происходит увеличение транспортной работы на 1581 тыс. м³·км, что вполне согласуется с физикой процесса транспортирования (транспортирование происходит на подъем). Также произошло небольшое снижение оптимальной транспортной работы на 29 тыс. м³·км.

Расчетные данные при уклоне рабочей площадки в сторону правого фланга приведены в Табл. 5, а их график кумулятивной транспортной работы при комбинации грузопотоков показан на Рис. 6. Минимальное значение транспортной работы соответствует точке 1576 м, смещение оптимума произошло в сторону левого фланга. Также произошло небольшое повышение оптимальной транспортной работы на 22 тыс. м³·км относительно отработки клиновидного блока без уклона. На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод:

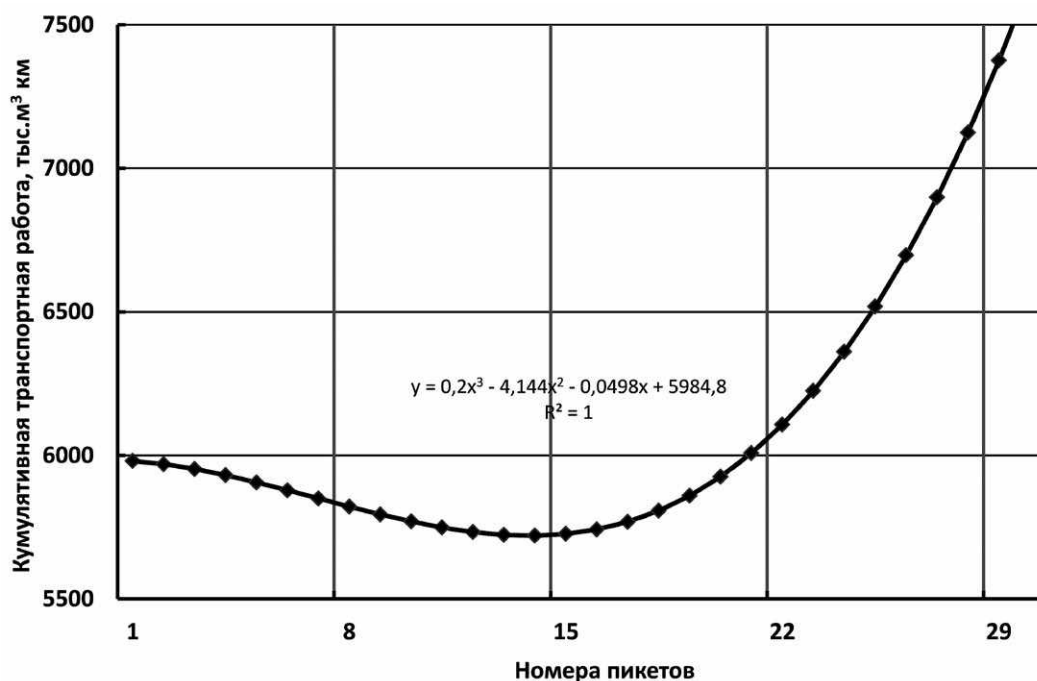


Рис. 5. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с уклоном рабочей площадки в сторону левого фланга

Fig. 5. Dependence of cumulative transport work with combined distribution of cargo flows with a slope of the working platform towards the left flank

Таблица 4. *Транспортная работа при уклоне рабочей площадки в сторону левого фланга фронта работ***Table 4.** *Transport work when the work site slopes towards the left flank of the work front*

Транспортирование через левый фланг фронта работ ($i=-10\%$)			Транспортирование через правый фланг фронта работ ($i=+10\%$)		
№ пикета	$\sum V_i L_{пр\ i}^B$ тыс. м ³ ·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м ³ ·км	№ пикета	$\sum V_i L_{пр\ i}^B$ тыс.м ³ ·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м ³ ·км
29	313,65	7375,71	0		
28	624,67	7124,61	1	5,39	5980,80
27	932,49	6898,81	2	22,04	5969,72
26	1236,55	6697,12	3	50,59	5952,75
25	1536,30	6518,34	4	91,68	5931,09
24	1831,16	6361,27	5	145,94	5905,94
23	2120,59	6224,71	6	214,03	5878,51
22	2404,01	6107,46	7	296,56	5849,98
21	2680,86	6008,32	8	394,19	5821,57
20	2950,60	5926,09	9	507,55	5794,47
19	3212,64	5859,57	10	637,28	5769,88
18	3466,44	5807,56	11	784,02	5749,00
17	3711,44	5768,86	12	948,41	5733,03
16	3947,06	5742,28	13	1131,09	5723,18
15	4172,75	5726,60	14	1332,69	5720,63
14	4387,95	5720,63	15	1553,85	5726,60
13	4592,09	5723,18	16	1795,22	5742,28
12	4784,62	5733,03	17	2057,43	5768,86
11	4964,98	5749,00	18	2341,12	5807,56
10	5132,60	5769,88	19	2646,92	5859,57
9	5286,92	5794,47	20	2975,49	5926,09
8	5427,38	5821,57	21	3327,45	6008,32
7	5553,42	5849,98	22	3703,45	6107,46
6	5664,48	5878,51	23	4104,12	6224,71
5	5760,00	5905,94	24	4530,10	6361,27
4	5839,41	5931,09	25	4982,04	6518,34
3	5902,16	5952,75	26	5460,56	6697,12
2	5947,68	5969,72	27	5966,32	6898,81
1	5975,41	5980,80	28	6499,94	7124,61
0	5984,80	5984,80	29	7062,06	7375,71
			30	7653,34	7653,34

Таблица 5. *Транспортная работа при уклоне рабочей площадки в сторону правого фланга фронта работ***Table 5.** *Transport work when the work site slopes towards the right flank of the work front*

Транспортирование через левый фланг фронта работ ($i=+10\%$)			Транспортирование через правый фланг фронта работ ($i=-10\%$)		
№ пикета	$\sum V_i L_{\text{Бпр } i}$ тыс. м ³ ·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м ³ ·км	№ пикета	$\sum V_i L_{\text{Бпр } i}$ тыс.м ³ ·км	Кумулятивная транспортная работа при комбинации грузопотоков, тыс. м ³ ·км
29	313,94	7061,00	0		
28	626,61	6843,03	1	5,38	6154,46
27	937,10	6649,20	2	21,94	6141,63
26	1244,76	6478,33	3	50,25	6121,75
25	1548,95	6329,20	4	90,87	6096,02
24	1849,04	6200,62	5	144,35	6065,65
23	2144,38	6091,38	6	211,26	6031,81
22	2434,34	6000,30	7	292,16	5995,73
21	2718,29	5926,16	8	387,60	5958,60
20	2995,57	5867,77	9	498,17	5921,61
19	3265,55	5823,92	10	624,40	5885,98
18	3527,60	5793,42	11	766,87	5852,89
17	3781,07	5775,08	12	926,13	5823,55
16	4025,32	5767,67	13	1102,75	5799,16
15	4259,72	5770,02	14	1297,28	5780,92
14	4483,63	5780,92	15	1510,30	5770,02
13	4696,41	5799,16	16	1742,35	5767,67
12	4897,42	5823,55	17	1994,01	5775,08
11	5086,03	5852,89	18	2265,83	5793,42
10	5261,58	5885,98	19	2558,37	5823,92
9	5423,45	5921,61	20	2872,20	5867,77
8	5570,99	5958,60	21	3207,87	5926,16
7	5703,58	5995,73	22	3565,95	6000,30
6	5820,56	6031,81	23	3947,00	6091,38
5	5921,30	6065,65	24	4351,58	6200,62
4	6005,16	6096,02	25	4780,25	6329,20
3	6071,50	6121,75	26	5233,57	6478,33
2	6119,69	6141,63	27	5712,10	6649,20
1	6149,08	6154,46	28	6216,41	6843,03
0	6159,03	6159,03	29	6747,06	7061,00
			30	7304,60	7304,60

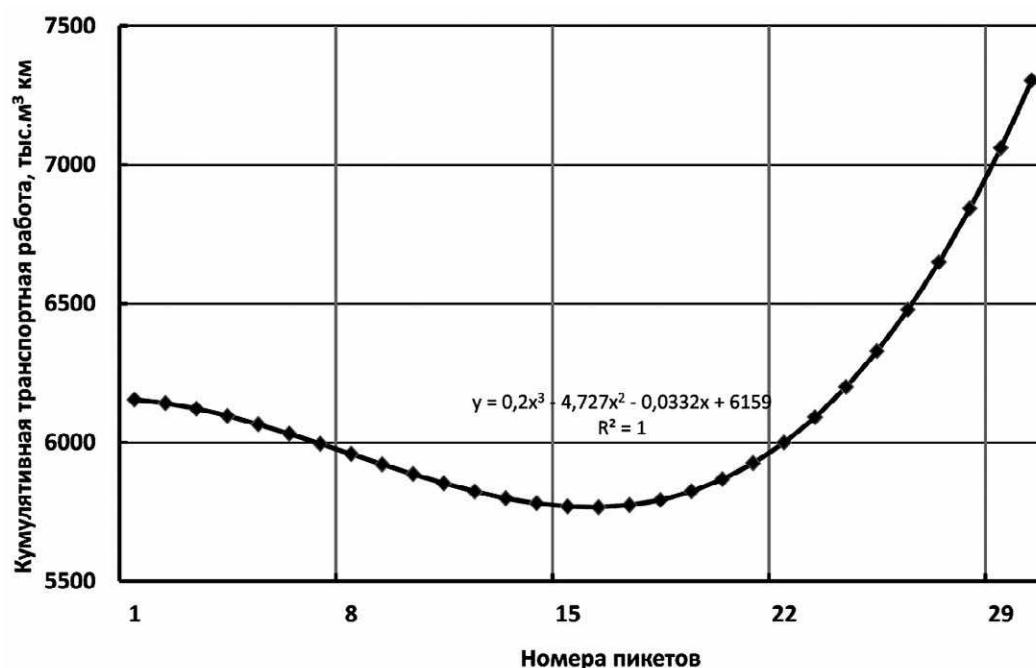


Рис. 6. Зависимость кумулятивной транспортной работы при комбинированном распределении грузопотоков с уклоном клиновидного блока в сторону правого фланга

Fig. 6. Dependence of cumulative transport work with combined distribution of cargo flows with the slope of the wedge-shaped block towards the right flank

при уклоне блока в сторону его широкой части объем транспортных работ уменьшается.

В данном исследовании рассмотрена оптимизация транспортной работы при веерной разработке месторождения с учетом приведенного расстояния транспортирования автомобильной трассы, направления грузопотока и уклона клиновидно-эксплуатационного блока.

ВЫВОДЫ

- При веерной системе разработки и направлении грузопотока в сторону широкой части клиновидного блока (вариант 1) суммарная транспортная работа всегда меньше, чем по варианту 2 (для условий, когда приведенные базовые расстояния транспортирования по маршрутам различаются в пределах 15–30%). Вариант 1 для вышеприведенных условий экономичнее варианта 2 (направление грузопотока в сторону узкой части блока) на 23,2%.
- Оптимизацию рекомендуется выполнять любым методом, изложенным в настоящей работе, по критерию минимальной

транспортной работы: графическим, аналитическим и анализе параметров кумулятивной транспортной работы для комбинации грузопотоков.

- Самым оптимальным вариантом является комбинация грузопотоков, при которой часть клиновидного блока направляется через левый фланг, а другая часть – через правый, что дает дополнительное снижение объема транспортных работ на 5–6% относительно лучшего варианта 1 при одностороннем направлении грузопотока.
- При проектировании веерной системы разработки следует отдавать предпочтение уклону клиновидно-эксплуатационного блока в сторону от узкой части к широкой, что обеспечивает дополнительное снижение транспортных работ.
- Данная работа вносит вклад в развитие технологии горных работ при веерной разработке месторождений.
- Предлагаемый подход оптимизации грузопотоков возможно применить и при других системах разработки, когда имеется несколько маршрутов транспортирования с одного уступа.

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. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра, 1980.
2. Вашлаев И.И., Михайлов А.Г., Селиванов А.В. Обоснование порядка отработки клиновидных блоков с учетом оптимизации грузопотоков горной массы // Проблемы недропользования. 2023. № 3. С. 109–117. doi: 10.25635/2313-1586.2023.03.109
3. Катышев П.В., Кисляков В.Е., Вокин В.Н. Обоснование направления транспортирования вскрышных пород при веерной системе разработки // Успехи современного естествознания. 2016. № 12. Ч. 1. С. 162–166. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36280>
4. Катышев П.В., Кисляков В.Е. Обоснование параметров фронта горных работ при отработке пологопадающих угольных месторождений веерной системой // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии.

2016. Т. 9, № 2. С. 166–173. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: <http://journal.sfu-kras.ru/article/20221>
5. Катышев П.В. Обоснование технологии выемки пологопадающих угольных месторождений при веерной системе разработки. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018.
 6. Кисляков В.Е., Катышев П.В. Исследование развития фронта горных работ на пологопадающих месторождениях при веерной системе разработки // Маркшейдерия и недропользование. 2014. №. 2. С. 42–44. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: <http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2014/91-contens-journal-2014-2.html>
 7. Кисляков В.Е., Никитин А.В., Катышев П.В. и др. Работа экскаваторов типа ЭКГ в клиновидной заходке // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 5. С. 44–50. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: <http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2013/94-contens-journal-2013-5.html>
 8. Шорохов В.П., Кисляков В.Е. Веерное подвигание фронта работ при разработке мощных угольных пластов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
 9. Галкин В.А., Караулов Г.А., Сидоренко В.Н. Горизонтальный эквивалент вертикального перемещения пород карьерными автосамосвалами // Известия вузов. Горный журнал. 1983. № 7. С. 14–18.
 10. Яковлев ВЛ. Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. Новосибирск: Наука, 1989.
 11. Лель Ю.И., Арефьев А.С., Дунаев С.А. и др. Развитие идей член-корр. ран В.Л. Яковлева по учету влияния горнотехнических условий эксплуатации на показатели карьерного автотранспорта // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 136–144. Дата обращения: 11.09.2024. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/68>
 12. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Определение горизонтального эквивалента перемещения горной массы автомобильным транспортом по энергетическому критерию при движении на уклонах // Известия вузов. Горный журнал. 1997. № 9–10. С. 87–90.
 13. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Определение горизонтального эквивалента автомобильной трассы в карьере по энергетическому критерию. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С. 175–177.
 14. Вашлаев И.И., Селиванов А.В. Управление погрузочно-транспортными процессами на открытых горных работах на основе интегрального показателя горнотехнических условий транспортирования. В кн.: Открытые горные работы в XXI веке: Сб. материалов Международной научно-практ. конф. (4–7 октября 2011). Красноярск, 2011. С. 250–256.
 15. Лель Ю.И., Арефьев А.С., Глебов А.В. и др. К вопросу оценки качества карьерных автодорог // Известия уральского государственного горного университета. 2016. № 3. С. 70–73.
 16. Арефьев А.С. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных самосвалов большой грузоподъемности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015.

17. Лель Ю.И., Салахияев Р.Г., Арефьев С.А. и др. Совершенствование нормирования расхода топлива карьерными автосамосвалами на основе горизонтальных эквивалентов вертикального перемещения горной массы // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 2. С. 107–115.

REFERENCES

1. Rzhnevsky VV. *Technology and complex mechanization of open-pit mining*. Moscow: Nedra; 1980. (In Russ.)
2. Vashlaev II, Mikhailov AG, Selivanov AV. Justification of the procedure for developing wedge-shaped blocks taking into account the optimization of rock mass cargo flows. *Problems of Subsoil Use*. 2023;3:109–117. (In Russ.) doi: 10.25635/2313-1586.2023.03.109
3. Katyshev PV, Kislyakov VE, Vokin VN. Justification of the direction of transportation of overburden rocks in the fan mining system. *Advances in modern natural science*. 2016;12(1):162–166. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36280>
4. Katyshev PV, Kislyakov VE. Justification of the parameters of the mining front when developing gently dipping coal deposits with a fan system. *Journal of the Siberian Federal University. Series: equipment and technology*. 2016;9(2):166–173. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: <http://journal.sfu-kras.ru/article/20221>
5. Katyshev PV. *Justification of the technology of extraction of gently dipping coal deposits with a fan mining system* [dissertation]. Krasnoyarsk; 2018.
6. Kislyakov VE, Katyshev PV. Study of the development of the mining front at gently dipping deposits with a fan mining system. *Mine surveying and subsoil use*. 2014;2:42–44. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: <http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2014/91-contens-journal-2014-2.html>
7. Kislyakov VE, Nikitin AV, Katyshev PV, et al. Operation of EKG type excavators in a wedge-shaped entry. *Mine surveying and subsoil use*. 2013;5:44–50. (In Russ.) Accessed: 11.09.2024. Available from: <http://n-gn.ru/issues-journal/journal-2013/94-contens-journal-2013-5.html>
8. Shorokhov VP, Kislyakov VE. *Fan-shaped advancement of the work front during the development of thick coal seams*. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2012. (In Russ.)
9. Galkin VA, Karaulov GA, Sidorenko VN. Horizontal equivalent of vertical movement of rocks by quarry dump trucks. *News of universities. Mining journal*. 1983;7:14–18. (In Russ.)
10. Yakovlev VL. *Theory and practice of choosing transport for deep quarries*. Novosibirsk: Nauka; 1989. (In Russ.)
11. Lel YuI, Arefyev AS, Dunaev SA, et al. Development of ideas of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences V.L. Yakovlev on taking into account the influence of mining and technical operating conditions on the performance of quarry vehicles. *Problems of Subsoil Use*. 2014;3:136–144. Accessed: 11.09.2024. Available from: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/68>

12. Vashlaev II, Selivanov AV. Determination of the horizontal equivalent of the movement of rock mass by motor transport according to the energy criterion when moving on slopes. *News of universities. Mining journal*. 1997;9–10:87–90. (In Russ.)
13. Vashlaev II, Selivanov AV. Determination of the horizontal equivalent of a motorway in a quarry based on the energy criterion. *Mining information and analytical bulletin*. 2003;8:175–177. (In Russ.)
14. Vashlaev II, Selivanov AV. Management of loading and transport processes in open-pit mining operations based on the integral indicator of mining and technical conditions of transportation. In: *Open-pit mining operations in the 21st century: Collection of materials from the International scientific and practical conference (October 4–7, 2011)*. Krasnoyarsk; 2011:250–256. (In Russ.)
15. Lel YuI, Arefyev AS, Glebov AV, et al. On the issue of assessing the quality of quarry roads. *Bulletin of the Ural State Mining University*. 2016;3:70–73. (In Russ.)
16. Arefyev AS. Assessment and justification of rational road conditions for the operation of heavy-duty quarry dump trucks: author's abstract [dissertation]. Ekaterinburg; 2015. (In Russ.)
17. Lel YuI, Salakhiev RG, Arefiev SA, et al. Improving the standardization of fuel consumption by quarry dump trucks based on horizontal equivalents of vertical movement of rock mass. *News of universities. Mining journal*. 2014;2:107–115. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Вашлаев Иван Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 5046-3886; ORCID: 0000-0001-7174-040X;
Scopus Author ID: 6508270604;
E-mail: vash49@gmail.com

Михайлов Александр Геннадьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник;
AuthorID: 66903; ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200;
E-mail: alemikhal@gmail.com

Зуев Алексей Евгеньевич, ведущий инженер;
ORCID: 0000-0003-0912-4395;
E-mail: alex_corp85@mail.ru

Information about the authors:

Ivan I. Vashlaev, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 5046-3886; ORCID: 0000-0001-7174-040X;
Scopus Author ID: 6508270604;
E-mail: vash49@gmail.com

Aleksandr G. Mikhaylov, Doctor of Technical Sciences;
AuthorID: 66903; ORCID: 0000-0001-5537-7479; Scopus Author ID: 8838711200;
E-mail: alemikhal@gmail.com

Alexey E. Zuev, MSc, lead engineer;
ORCID: 0000-0003-0912-4395;
E-mail: alex_corp85@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

<https://doi.org/10.17816/transsyst632001>

© Т.Н. Замота, А.С. Лошаков, Е.В. Турушина

Луганский государственный университет имени В. Даля
(Луганск, Россия)

ОЦЕНКА ПОТОКА ОТКАЗОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРА ИЗРАСХОДОВАННОГО РЕСУРСА

Цель. Статья рассматривает методы технической диагностики узлов и систем транспортных средств по значению параметра израсходованного ресурса.

Методы. Разработка системы контроля за потоком отказов, которая позволит своевременно их выявлять, прогнозировать развитие поломок и применять меры технического воздействия.

Результаты. Параметрами для оценки надежности являются состояние подвески и рулевого управления и компрессия при оценке двигателя.

Заключение. Разработка интеллектуальных систем диагностирования и прогнозирования позволит повысить эффективность и надежность автомобилей в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р); транспортные средства; поток отказов; ресурс; долговечность.

Как цитировать:

Замота Т.Н., Лошаков А.С., Турушина Е.В. Оценка потока отказов транспортных средств по изменению параметра израсходованного ресурса // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 618–629. doi: 10.17816/transsyst632001

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Ground transport and technological means and complexes

© T.N. Zamota, A.S. Loshakov, E.V. Turushina

Lugansk State University named after V. Dahl

(Lugansk, Russia)

ASSESSMENT OF THE FAILURE RATE OF VEHICLES BY CHANGING THE PARAMETER OF THE CONSUMED RESOURCE

Aim. The article examines methods of technical diagnostics of units and systems of Aim. The article examines the methods for diagnosing vehicle units and based on their resource usage parameter.

Methods. A system was developed to monitor failure trends, ensuring timely detection, prediction of potential breakdowns, and implementation of technical measures.

Results. Key parameters for assessing reliability include suspension and steering conditions, and engine compression.

Conclusion. The development of intelligent diagnostic and forecasting systems can improve vehicle efficiency and reliability under real-life operating conditions.

Keywords: maintenance and repair (M&R); vehicles; failure rate; service life; durability.

To cite this article:

Zamota TN, Loshakov AS, Turushina EV. Assessment of the failure rate of vehicles by changing the parameter of the consumed resource. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):618–629. doi: 10.17816/transsyst632001

ВВЕДЕНИЕ

Методы оценки надежности автомобилей базируются, в основном, на теории вероятностей. Понятие надежности включает в себя четыре основные составляющие: вероятность безотказной работы, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Существующие методы прогнозирования оптимального момента проведения ТО (технического обслуживания) и Р (ремонта) транспортных средств, в том числе, органолептические методы, методы периодического объективного контроля являются малоэффективными, они не способны точно определить сроки предупредительных ремонтов и своевременной замены узлов и агрегатов, срок службы которых значительно сокращается в реальных условиях эксплуатации [1]. В связи с этим необходимо разработать теоретическую базу постоянного диагностирования наиболее нагруженных узлов и агрегатов транспортных средств, основанную на использовании технологии интеллектуальных информационных систем [2, 3]. Определение сроков предупредительного ремонта и обслуживания позволяет перейти от адаптивных систем диагностирования и прогнозирования к интеллектуальной системе диагностики, а также прогнозированию выхода из строя узлов и агрегатов автомобиля, условия эксплуатации которого не соответствует рекомендованным заводом-изготовителем [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные по пробегу и наработке до отказа, а также величине потока отказов в средних и критических дорожных условиях определялись на пассажирском автотранспортном предприятии (АТП), которое обеспечивает перевозку пассажиров в системе горных предприятий региона [5]. При эксплуатации парк подвижного состава АТП всегда должен находиться в работоспособном состоянии. С учетом изношенности транспортных средств необходима система контроля за потоком отказов, которая позволит своевременно их выявлять, прогнозировать развитие поломок и применять меры технического воздействия, значительно повышающие эффективность эксплуатации [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительные исследования по изучению надежности транспортных средств в АТП по перевозке пассажиров показали, что основными затратами на эксплуатацию автобусов в исследуемом АТП являются затраты на подвеску и рулевое управление, обусловленные

неудовлетворительным дорожным покрытием в регионе. Причем, на автобусы Ikarus средств необходимо тратить по этой статье расходов в пять раз больше, чем на автобусы Mercedes, Man, Volvo.

Периодическая проверка состояния ТС (транспортного средства) выявила поломки базовых деталей в условиях реальной эксплуатации, которые могли привести к аварийной ситуации на дороге [7]. Отрыв крепления шаровой опоры показал, что была пропущена трещина, которая длительное время развивалась и способствовала появлению вибрации и нарушению геометрии подвески. Отсутствие датчиков, способных контролировать виброакустические параметры работы подвески и других систем, контролирующих правильную работу амортизаторов и подушек, приводят к тому, что отказы становятся внезапными, значительно увеличивают стоимость ремонта и снижают безопасность эксплуатации ТС [8]. Полученные данные, позволяющие оценить ресурс деталей подвески, представлены в Табл.

Условием наступления отказа при различных режимах работы является равенство единице произведения величины потока отказов на время работы механизма ($\lambda_j \cdot t_j = 1$).

На Рис. 1 представлена схема взаимосвязей потоков отказов элементов задней подвески автобусов.

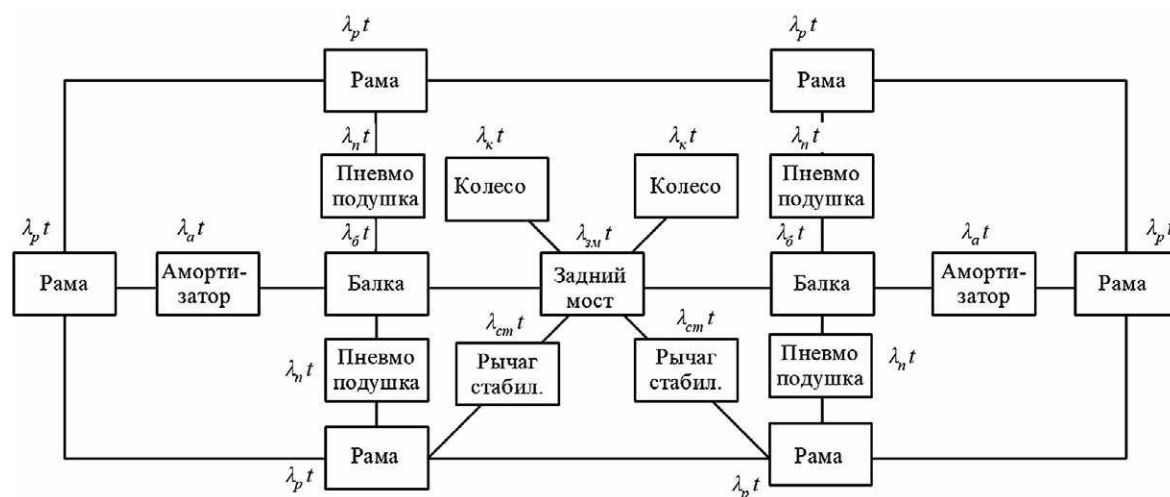


Рис. 1. Схема взаимосвязей потоков отказов элементов задней подвески автобусов:
 λ_p – поток отказов рамы; λ_a – амортизатора; $\lambda_б$ – балки; $\lambda_п$ – пневмоподушки;
 $\lambda_к$ – колеса; $\lambda_ст$ – рычага стабилизатора

Fig. 1. Diagram of the relationships between the failure flows of the elements of the rear suspension of buses: λ_p – failure flow of the frame; λ_a – shock absorber; $\lambda_б$ – beam; $\lambda_п$ – air cushions; $\lambda_к$ – wheels; $\lambda_ст$ – stabilizer arm

Таблица. Ресурс деталей подвески пассажирского автобуса Икарус**Table.** Resource of suspension parts of the Ikarus passenger bus

Деталь или узел подвески	Дорожные условия					
	критические			средние		
	пробег до отказа, тыс. км	наработка до отказа, ч	величина потока отказов, λ , 1/ч	пробег до отказа, тыс. км	наработка до отказа, ч	величина потока отказов, λ , 1/ч
Амортизаторы	15	300	0,0035	35...40	700...800	0,0015... 0,00125
Балка заднего моста	50...70	1000... 1400	0,001... 0,0007	60...80	1200... 1600	0,00083... 0,00065
Пневмо-подушка	80	1600	0,00065	100	2000	0,0005
Сайлентблоки рычагов	20	400	0,0025	50	1000	0,001
Шкворня	25...35	500...700	0,002... 0,0015	80		0,00065
Опорные подшипники шкворней	35	700	0,0015	50	1000	0,001
Пыльники рулевых шарниров	20	400	0,0025	50	1000	0,001
Механизм маятника прицепа	30	600	0,00165	60...80	1200... 1600	0,00083... 0,00065

В период нормальной эксплуатации надежность машин характеризуется внезапными отказами [9]. Считается, что эти отказы появляются при неблагоприятном стечении различных факторов эксплуатации и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия:

$$\lambda(t) = \text{const} = \frac{1}{M(x)} \quad (1)$$

где $M(x)$ – средняя наработка до отказа. Тогда λ выражается числом отказов в единицу времени.

Значение средней наработки до отказа равно:

$$M(x) = \frac{\sum_{i=1}^n M_i(x)}{n}, \quad (2)$$

где i – порядковый номер интервала наработки, при котором произошел отказ изделия; n – количество интервалов в выборке.

С учетом (2) становится очевидно, что реальное значение наработки на отказ находится в интервале от $M_i(x)=\min$ до $M_i(x)=\max$. Соответственно, для отдельно взятого изделия $\lambda(t)$ может отличаться от рассчитанного значения по формуле (1).

Широкое распространение при описании надежности сложных технических изделий получил экспоненциальный закон распределения случайной величины [10]. С помощью этого закона с достаточной точностью можно аппроксимировать время безотказной работы особо ответственных машин, эксплуатируемых в период после окончания приработки; машин с последовательной заменой отказавших деталей; сложных объектов, состоящих из многих элементов.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

Эта вероятность подчиняется экспоненциальному закону распределения и одинакова для любого равновеликого промежутка времени в период нормальной эксплуатации.

Используя экспоненциальный закон распределения, несложно определить среднее число изделий n , которые выйдут из строя к заданному моменту времени, и среднее число изделий N_p , которые останутся работоспособными. При $\lambda \cdot t < 0,1$ справедлива формула разложения в ряд (4)

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \frac{(\lambda t)^4}{4!} - \dots \approx 1 - \lambda t \quad (4)$$

Если работа изделия происходит при разных режимах, а следовательно, и интенсивностях отказов λ_1 (за время t_1) и λ_2 (за время t_2), то

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}, \quad (5)$$

Допущение о постоянстве режима эксплуатации возможно для стационарных машин, работающих в неизменных или слабо

изменяющихся условиях. Применительно к автотранспорту такой подход является малообоснованным.

Вероятность отказа $Q(t)$ с учетом формулы (5) находится по следующей формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}, \quad (6)$$

При случайных изменениях режима работы λ_j за определенные периоды работы t_j , вероятность отказа будет выражена следующим образом:

$$Q(t) = 1 - e^{-\sum_{j=1}^k \lambda_j t_j}, \quad (7)$$

где j – порядковый номер интервала наработки, при котором наблюдался определенный режим работы; k – количество интервалов в выборке.

Отказ наступает при достижении у какого-либо параметра работающего механизма предельного значения. Для более полной оценки работоспособности используются интегральные параметры. Например, таким параметром является величина компрессии при оценке состояния двигателя внутреннего сгорания. Уменьшение компрессии в цилиндре ДВС (двигателя внутреннего сгорания) может быть вызвано целым рядом причин (износ гильзы, износ поршневых колец или их поломка, износ клапанов или гнезд и т.д.). Снижение компрессии до предельного значения вызывает необходимость проведения ремонта и устранения поломки. В данном случае удастся контролировать зазор между поршнем и гильзой. На Рис. 2 показано изменение диагностического параметра, определяющего ресурс механизма, от начального значения до предельного.

Тогда, максимальное значение ресурса, выраженное в часах работы механизма, можно записать в следующем виде

$$t_{\max} = \frac{S_{\text{пред}} - S_{\text{нач}}}{\text{tg}\alpha}, \quad (8)$$

рабочее значение ресурса будет

$$t_p = \frac{S_{\text{раб}} - S_{\text{нач}}}{\text{tg}\alpha}, \quad (9)$$

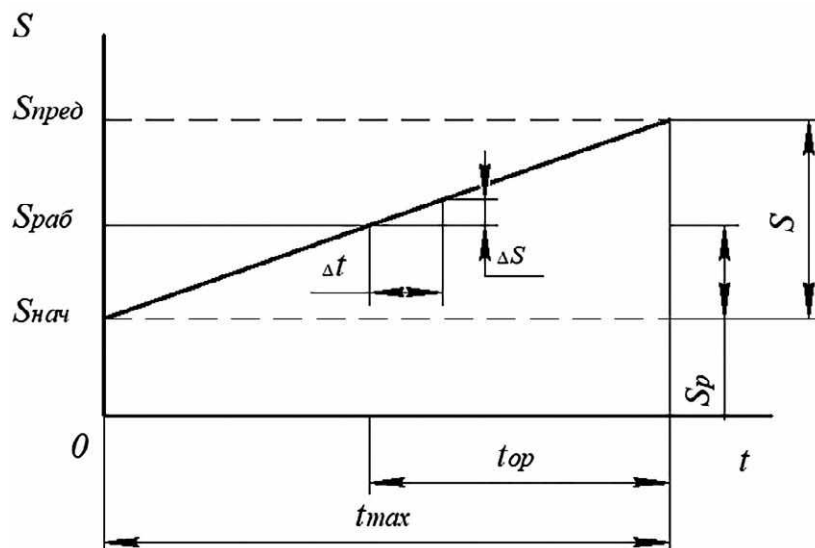


Рис. 2. Изменение диагностического параметра, определяющего ресурс механизма, от начального значения $S_{нач}$ до предельного $S_{пред}$: $S_{раб}$ – рабочее значение диагностического параметра (ДП); S – полный интервал изменения ДП; S_p – рабочий интервал изменения ДП; t_{max} – максимальная наработка, выраженная в часах или км (ресурс); t_{op} – значение остаточного ресурса

Fig. 2. Change of the diagnostic parameter determining the resource of the mechanism, from the initial value $S_{нач}$ to the limit $S_{пред}$: $S_{раб}$ – is the working value of the diagnostic parameter (ДП); S – is the full interval of ДП change; S_p – is the working interval of ДП change; t_{max} – is the maximum operating time, expressed in hours or km (resource); t_{op} – is the value of the remaining resource

а значение остаточного ресурса

$$t_{op} = \frac{S_{пред} - S_{раб}}{tg\alpha}, \quad (10)$$

Если принять начальное значение параметра израсходованного ресурса δ , по которому удобно определять работоспособное состояние механизма, за 0, то можно получить следующее выражение:

$$\delta = \lambda t = 1 - \frac{t_{op}}{t_{max}} = 0, \quad (11)$$

Из выражения (8) видно, что в начальный момент эксплуатации остаточный ресурс равен максимальному ($t_{op} = t_{max}$), а параметр израсходованного ресурса равен 0.

Отношение приращения функции изменения ДП к промежутку времени, за которое это изменение произошло, является дифференциалом функции $s = f(t)$.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = tg\alpha = \frac{S_{пред} - S_{нач}}{t_{max}}, \quad (12)$$

где α – угол наклона прямой изменения диагностического параметра.

По аналогии с формулой (4), можно записать вероятность безотказной работы, как функцию от изменения интегрального параметра

$$P(t) \approx 1 - \delta = 1 - \frac{t_{op}}{t_{max}} = \frac{S_{пред} - S_{раб}}{S_{пред} - S_{нач}}, \quad (13)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ в этом случае с учетом формулы (6 и 13)

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-(\delta_1 + \delta_2)}, \quad (14)$$

При случайных изменениях режима работы δ_j за определенные периоды работы t_j , вероятность отказа будет выражена следующим образом:

$$Q(t) = 1 - e^{-\sum_{j=1}^k \left(1 - \frac{S_{пред} - S_{раб}}{S_{пред} - S_{нач}}\right) j}, \quad (15)$$

где j – порядковый номер интервала наработки, при котором наблюдался определенный режим работы; k – количество интервалов в выборке.

При неизменном режиме работы механизма параметр израсходованного ресурса δ будет постоянным, а зависимость (15) примет упрощенный вид (16)

$$Q(t) = 1 - e^{-\delta} = 1 - e^{-\left(1 - \frac{S_{пред} - S_{раб}}{S_{пред} - S_{нач}}\right)}, \quad (16)$$

ВЫВОДЫ

1. Предложено оценивать работоспособность машин по значению параметра израсходованного ресурса δ . Это позволяет значительно уточнить прогнозирование надежности сложных технических систем.
2. Предлагаемый параметр израсходованного ресурса δ будет изменяться от 0, в начале эксплуатации, до 1, при выработке ресурса, вне зависимости от типа сопряжения и происходящих процессов потери работоспособности.

3. Изучение сложных технических систем с помощью параметра израсходованного ресурса δ позволит контролировать их в режиме реального времени, на практике внедрить интеллектуальную систему технического обслуживания и значительно повысить технико-экономические показатели эксплуатации.

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. Замота Т.Н., Замота О.Н., Гринько Е.Т. Усовершенствование системы эксплуатации легковых автомобилей при существующей точности деталей и анализе потока // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (12). С. 283–290.
2. Замота Т.Н., Аулин В.В., Панайотов К.К., и др. Техничко-экономические аспекты усовершенствования стратегии технического обслуживания и ремонта транспортных средств. Луганск: Ноулидж, 2022.
3. Замота Т.Н., Сметана С.А., Замота О.Н., и др. Техничко-экономические подходы к усовершенствованию системы технического обслуживания и ремонта автобусов // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2022. № 4(17). С.314–321.
4. Замота Т.Н., Замота О.Н., Гринько Е.Т. Анализ технико-экономических затрат на эксплуатацию автомобиля в пределах жизненного цикла // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2022. №7 (61). С. 59–65.
5. Bokor Z. Cost Drivers in Transportand Logistics // Periodica Polytechnicaser. Transportation Engineering. 2010. Vol. 38, N. 1. P. 13–17. doi: 10.3311/pp.tr.2010-1.03
6. Askarany D., Yazdifar H., Askary S. Supply chain management, activity-based cost in gand organisational factors // International Journal of Production Economics. 2010. Vol. 127, N. 2. P. 238–248. doi: 10.1016/j.ijpe.2009.08.004
7. Кабанов И.С. Разработка информационной автоматизированной системы для исследования управляемых моделей надежности и эффективности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004.
8. Зорин А.И. Повышение эффективности ремонтнообслуживания средств механизации АПК на основе организационно-инженерных мероприятий на примере Удмуртской Республики: дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2006.

9. Курлышев О.В. Методы и программно-аппаратные средства дистанционного контроля состояния узлов автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2006.
10. Об утверждении норм расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте» от 08 июня 2020 г. Луганск № 139 [internet] Дата обращения: 23.05.2024. Режим доступа: <https://mintrans-lnr.su/>

REFERENCES

1. Zamota TN, Zamota ON, Grinko ET. Improvement of the passenger car operation system with the existing accuracy of parts and flow analysis. *Scientific Bulletin of the Lugansk State Agrarian University*. 2021;3(12):283–290. (In Russ.)
2. Zamota TN, Aulin VV, Panayotov KK, et al. *Technical and economic aspects of improving the strategy of maintenance and repair of vehicles*. Lugansk: Noulidzh, 2022. (In Russ.)
3. Zamota TN, Smetana SA, Zamota ON, et al. Technical and economic approaches to improving the system of maintenance and repair of buses. *Scientific bulletin of the Lugansk State Agrarian University*. 2022;4(17):314–321. (In Russ.)
4. Zamota TN, Zamota ON, Grinko ET. Analysis of the technical and economic costs of operating a car within the life cycle. *Bulletin of the LSU named after V. Dahl*. 2022;7(61):59–65. (In Russ.)
5. Bokor Z. Cost Drivers in Transportand Logistics. *Periodica Polytechnicaser. Transportation Engineering*. 2010;38(1):13–17. doi: 10.3311/pp.tr.2010-1.03
6. Askarany D, Yazdifar H, Askary S. Supply chain management, activity-based cost in gand organisational factors. *International Journal of Production Economics*. 2010;2:238–248. doi: 10.1016/j.ijpe.2009.08.004
7. Kabanov IS. *Development of an information automated system for the study of controlled models of reliability and efficiency*. [dissertation] Moscow; 2004. (In Russ.)
8. Zorin AI. *Improving the efficiency of maintenance of agricultural mechanization facilities on the basis of organizational and engineering measures on the example of the Udmurt Republic*. [dissertation] St. Petersburg; 2006. (In Russ.)
9. Kurlyshev OV. *Methods and software and hardware for remote monitoring of the condition of vehicle components*. [dissertation] Izhevsk; 2006. (In Russ.)
10. On approval of fuel and lubricants consumption standards in road transport dated June 08, 2020, Lugansk No. 139 [internet] Accessed: 23.05.2024. Available from: <https://mintrans-lnr.su/>

Сведения об авторах:

Лошаков Александр Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры «Автомобильный транспорт»;
eLibrary SPIN: 5820-4660; ORCID: 0009-0004-5690-7186;
E-mail: keksvrue@yandex.ru

Замота Тарас Николаевич, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой

«Автомобильный транспорт»;

eLibrary SPIN: 4443-7346; ORCID: 0000-0002-9904-4518;

E-mail: zamota71@rambler.ru

Турушина Елена Викторовна, старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт»;

ORCID: 0009-0000-8108-0089;

E-mail: dahl.univer@yandex.ru

Information about the authors:

Alexandr S. Loshakov, postgraduate student, assistant of the Department of Automobile Transport;

eLibrary SPIN: 5820-4660; ORCID: 0009-0004-5690-7186;

E-mail: keksvrucke@yandex.ru

Taras N. Zamota, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport;

eLibrary SPIN: 4443-7346; ORCID: 0000-0002-9904-4518;

E-mail: zamota71@rambler.ru

Elena V. Turushina, senior lecturer of the Department of Automobile Transport;

ORCID: 0009-0000-8108-0089;

E-mail: dahl.univer@yandex.ru

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<https://doi.org/10.17816/transsyst641656>

© Н.А. Журавлева, Т.А. Крюкова, Е.В. Новикова

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЪЕМОВ И СТРУКТУРЫ ПЕРЕВОЗОК ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ В ГРАНИЦАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПОЛИГОНА ОАО «РЖД» В УСЛОВИЯХ СМЕЩЕНИЯ ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК

Обоснование. Существенное смещение цепей поставок изменило структуру и объемы грузовых железнодорожных перевозок.

Цель. Модификация расчета показателей объемов и структуры грузовых перевозок с учетом пропускной и провозной способности железных дорог.

Методы. Динамический анализ выборки статистических рядов, алгоритм определения условной плотности груза в транспортно-логистических комплексах, прогнозирования региональных железнодорожных перевозок до 2025 года.

Результаты. Проведена переоценка показателей «грузооборот», «объем грузовых перевозок», «структура грузопотока» с учетом влияния показателей «пропускная и провозная способность железных дорог». Уточнены плановые объемы перевозки и перевалки основных видов грузов на припортовых станциях на период 2024-2025 гг., что позволяет повысить достоверность принимаемых решений по развитию железнодорожной инфраструктуры полигона Октябрьской железной дороги, в том числе, подходов к морским портам и международного транспортного коридора «Север-Юг».

Ключевые слова: грузооборот; объем перевозок; пропускная; провозная способность инфраструктуры.

Как цитировать:

Журавлева Н.А., Крюкова Т.А., Новикова Е.В. Расчет показателей объемов и структуры перевозок грузов железнодорожным транспортом в границах Северо-Западного полигона ОАО «РЖД» в условиях смещения цепей поставок // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т.10. № 4. С. 630–643. doi: 10.17816/transsyst641656

Rubric 3. TRANSPORT ECONOMICS

© N.A. Zhuravleva, T.A. Kryukova, E.V. Novikova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**CALCULATION OF INDICATORS OF VOLUMES
AND STRUCTURE OF CARGO TRANSPORTATION
BY RAIL WITHIN THE BOUNDARIES OF THE NORTH-WEST
POLYGON OF JSC RUSSIAN RAILWAYS IN THE CONTEXT
OF SHIFTING SUPPLY CHAINS**

Abstract. Recent changes in supply chains have significantly changed the structure and volume of rail freight transportation.

Aim. To adjust the calculation methods for freight transportation volumes and structure, considering railway throughput and carrying capacity.

Methods. They study utilized dynamic analysis of statistical data, an algorithm for determining the conditional cargo density in the transport and logistics complexes, and regional rail transportation forecasting until 2025.

Results. Key indicators such as “freight turnover,” “volume of freight transportation,” and “freight flow structure” were re-evaluated, incorporating the impact of “railway throughput and carrying capacity.” These findings are crucial for the planning and design of new rail infrastructure. The planned volumes of transportation and transshipment of the main types of cargo at port stations for the period 2024-2025 have been clarified, which makes it possible to increase the reliability of decisions made on the development of the railway infrastructure of the October Railway polygon, including approaches to sea ports and the North-South international transport corridor.

Keywords: freight turnover; volume of transportation; throughput capacity of infrastructure; carrying capacity of infrastructure.

To cite this article:

Zhuravleva NA, Kryukova TA, Novikova EV. Calculation of indicators of volumes and structure of cargo transportation by rail within the boundaries of the North-West polygon of JSC Russian Railways in the context of shifting supply chains. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):630–643. doi: 10.17816/transsyst641656

ВВЕДЕНИЕ

В последние два года существенно сместились цепи поставок грузов как в азиатско-европейской транспортной системе, так и в — отечественной: рост отправок в восточном направлении и их снижение в европейском. Соответственно, изменились объемы и структура перевозок грузов на полигоне Октябрьской железной дороги (филиала ОАО «РЖД»), в частности, на подходах к морским портам, прежде всего, Северо-Западного федерального округа (далее по тексту СЗФО), изменив конфигурацию части международных транспортных коридоров (далее по тексту МТК). Факторы, определяющие эти процессы, описаны рядом авторов, в частности [1, 2].

Несмотря на сильное влияние негативных факторов санкционного и политического характера транспортный полигон СЗФО остается мощным элементом транспортной системы страны и международных транспортных коридоров, что подтверждают исследования ОАО «Институт экономики развития транспорта», в частности [3]. Обладая развитой, логистически связанной железнодорожной и портовой инфраструктурой, транспорт СЗФО обеспечивает поставки грузов с северных территорий к морским портам, выход к Балтийскому морю через МТК «Север-Юг» и «Восток-Запад». В 2022 г. общий потенциал портов Северо-Запада (перерабатывающая способность) составлял 242,8 млн. т, а общий железнодорожный грузооборот портов Северо-Запада. 149,8 млн. т [4]. При этом следует отметить высокий уровень управления логистикой в регионе, положительно влияющий на пропускную и провозную способность транспортной инфраструктуры.

Проведенный авторами анализ производственного потенциала российских производителей и грузопотребителей СЗФО, показал, что в преобладающем большинстве они сохранили свои объемы производства и потребления, а, следовательно, объемы грузов, предъявляемых к перевозке. По отдельным видам грузов, производители наращивают свои объемы, в частности, по каменному углю: АО «СУЭК-Кузбасс» — ООО «Ультрамар»; по рудным грузам: ООО «РТС» — ПАО «Северсталь»; по удобрениям: ПАО «Уралкалий» — ООО «ПГ «ФОСФОРИТ» и пр. Отмечено восстановление спроса на российский уголь, рудные металлы и удобрения к концу 2022 г., при этом, часть объемов продукции, предназначенной для закрывшегося европейского рынка, перенаправлено в другие регионы [5, 6]. Тренд по ряду грузов сохраняется по настоящее время, что подтверждают инвестиционные планы отдельных компаний,

в частности, ПАО «Северсталь» в 2024 г. инвестировало в расширение производства железорудных окатышей – 116 миллиардов рублей, ПАО «Уралкалий» в 2024 г. нарастил подвижной парк до 7900 вагонов-минераловозов [7, 8]. В перспективе стратегического развития МТК, проходящих через СЗФО, отмечено увеличение грузопотоков, планируемых к перевозке железнодорожным транспортом (полигон Октябрьской железной дороги, далее по тексту – ОЖД) к морским портам [9]. Таким образом, транспортная система региона сохраняет свою значимость в отечественных и международных перевозках и развитие ее инфраструктуры остается одной из важнейших задач роста российской экономики.

Целью данного исследования является создание надежного инструментария расчета показателей объемов и структуры перевозок грузов железнодорожным транспортом, прежде всего, для проектов развития транспортной инфраструктуры.

Объектом исследования является транспортный полигон ОЖД. Полигон является приграничным и обеспечивает связь железнодорожного транспорта с морскими и с сухими портами – внутренними терминалами, связывающими автомобильные, железнодорожные перевозки с морским портом, в частности, «Модуль Пулковский», «Модуль Южный» и пр.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В целях расчета показателей грузовых железнодорожных перевозок (Северо-Западный полигон) принята следующая исходная информация:

1. Статистические данные по объемам грузооборота и погрузки грузов железнодорожным транспортом (в том числе, выделено по СЗФО) приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Перевозки грузов железнодорожным транспортом (млн. т)

Table 1. Freight transportation by rail (million t)

Год /месяц	январь	март	июнь	июль	сентябрь	декабрь
2022	104,219	106,793	100,154	102,184	100,957	102,916
2023	99,413	109,358	101,621	103,337	101,166	100,895
В % к предыдущему году	104,9	102,1	109,4	102,4	105,0	105,3
В % к предыдущему месяцу	96,8	107,8	102,6	100,6	99,2	98,6
2024	94,999	105,504	98,484	97,499		

Составлено по: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>

2. Общий объем грузовой работы, выполненный на железнодорожных станциях полигона ОЖД с распределением на железнодорожные пограничные переходы (ЖДПП) представлены в Табл. 2.

Таблица 2. *Общий объем грузовой работы.*

Table 2. *Total volume of cargo handling.*

Пограничное государство	ЖДПП	Условное количество поездов, пропущенных в ед. времени в 2022 г.		Грузооборот, 2022 г. млн. т
		пар поездов	поездов в год	
Финляндия	Бусловская	от 3 суток до 1,5 недель	2818	7,01
	Светогорск			
	Кивиярви			
	Вяртисиля			
Эстония	Ивангород	от 1,5/ сут. до 4/ нед.	755	3,86
	Печоры-Псковские			
Латвия	Пыталово – Скангали	от 4/ нед. до 3/ сут.	1303	9.96
	Себеж – Зилупе			
Белоруссия	Заверезье	6/ сут.	2 125	8,29

Составлено авторами по данным из открытых источников.

3. Данные по терминально-логистическим центрам полигона ОЖД показаны в Табл. 3.

Таблица 3. *Терминально-логистические центры полигона ОЖД*

Table 3. *Terminal and logistics centers of the October Railway polygon*

Наименование ТЛЦ	Жд - станция	Мощность ТЛЦ	Уровень загрузки ТЛЦ, ДФЭ			Уровень загрузки, 2022 г.
		TEU/ год	2020 г.	2021 г.	2022 г.	%
Логистический парк Янино»	Занев.пост	200 000	22 962	20 723	32 565	16,28
«Модуль»	Купчинская	60 000	65 504	54 758	45 955	76,59
«Модуль»	Предпортовая	200 000	158 858	139 417	89 513	44,76
ЗАО «Логистика-терминал»	Шушары	340 000	172 224	183 774	140 639	41,36
ООО Восход»	Шушары	200 000	68 410	61 431	59 340	29,67
Итого		1 000 000	487 958	460 103	368 012	36,8

Составлено авторами по данным из открытых источников.

Из проведенного наблюдения и динамического анализа следует, что из-за приостановки грузового железнодорожного сообщения с Финляндией и Прибалтийскими государствами уровень загрузки указанных транспортно-логистических центров в целом, в 2022 году снизился по сравнению с 2020 годом почти на 25%. Единственным маршрутом до апреля 2023 г. включительно производились поставки сырья на крупнейший завод «Норильский никель» (г. Харьявалта, Финляндия) с объемом производства в 5% от общемирового, с мая 2023 г. логистика поставок нарушена [10, 11].

В целом, за рассматриваемый период (2018–2022 гг.) суммарный объем перевозок составил 1 740,7 млн. тонн различных грузов, объем грузовых перевозок за 2022 г. снизился на 5% к 2021 г. (Табл. 1–3). Гополитические, макроэкономические и эпидемиологические ограничения существенно не повлияли на объемы перевозок на полигоне Октябрьской железной дороги: снижение в -2% к объемам 2018 г. можно рассматривать как незначительное. При этом снижение объемов выгрузки за период (-6,2%) частично компенсируется ростом объемов погрузки (+7,3%). Погрузка, как один из самых существенных показателей работы транспортной системы региона, в отдельных основных номенклатурных групп грузов росла вплоть до настоящего времени. Так, по данным оперативной отчетности ОЖД за январь-ноябрь 2024 г. погрузка химических и минеральных удобрений – выросла на 4,6%; цемента на 11,7%; зерна на 27,6% к аналогичному периоду 2023 года [12].

Терминально-логистические центры по переработке контейнеров, работающие в режиме сухих портов (тыловых терминалов) отработали как стратегическое направление диверсификации деятельности ОЖД. Рост контейнерного оборота при морских портах Северо-Запада обеспечил создание логистических центров с совокупным потенциалом по переработке контейнеров в 1 млн. TEU/ год. По итогам 2022 г. резервы перерабатывающих способностей ТЛЦ составили – 631988 TEU/ год (63,2%) (Табл. 3).

Провозная способность терминально-логистических центров установлена согласно алгоритму:

– определена условная плотность груза со значением в 1000 кг/м^3 исходя из нормативов по видам ключевых видов грузов (Табл. 4).

– конвертирована пропускная мощность ТЛЦ из TEU в млн. тонн с условием, что плотность груза составляет 1000 кг/м^3 и $1 \text{ teu} = 38,54956 \text{ т}$. При обработке статистических данных учитывались исследования

прогнозирования региональных железнодорожных перевозок в разрезе укрупненной номенклатуры грузов [13]. Результаты математической операции представлены в Табл. 5.

Динамический анализ возможности портовой инфраструктуры полигона ОЖД по итогам 2022 г. показал совокупный потенциал (перерабатывающую способность) морских портов Северо-Запада (Табл. 6).

При совокупном потенциале морских портов СЗФО в 242,8 (100%) млн. тонн за 2022 г. в указанные морские порты было направлено с последующей переработкой и перевозкой 149,8 (61,7%) млн т грузов, таким образом, резервы перерабатывающих способностей морских портов составили 93 млн тонн (38,3%) (Табл. 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом исследования является расчет показателей объемов и структуры перевозок грузов железнодорожным транспортом в границах Северо-Западного полигона российских железных дорог в условиях смещения цепей поставок.

Таблица 4. Условная плотность груза

Table 4. Conditional density of cargo

Вид груза (при нормальной температуре в 20 °С)	Плотность, кг/м ³
Нефть и нефтепродукты	800–980
Каменный уголь	11 000–13 050
Химические и минеральные удобрения	550–1 450

Источник: данные из открытых источников, анализ авторов.

Таблица 5. Пропускная мощность ТЛЦ

Table 5. TLC throughput capacity

Наименование ТЛЦ	Ж.д. станция	Мощность ТЛЦ, млн. т/г
ООО «Логистический парк Янино»	Занев.пост	16,27
ООО «Модуль»	Купчинская	2,44
ООО «Модуль»	Предпортовая	8,13
ЗАО «Логистика-терминал»	Шушары	13,82
ООО «Восход»	Шушары	8,13
Итого		48,79

Источник: авторский анализ данных открытых источников.

Таблица 6. *Морские порты полигона ОЖД***Table 6.** *Sea ports of the October Railway polygon*

Наименование	Припортовые ж.д. станции, используемые при анализе данных	Грузооборот 2022 г., млн. т	Уровень загрузки, 2022 г., %
Выборг	Выборг-эксп, Выборг	1,3	49,00
Высоцк	Высоцк-эксп, Высоцк	11	55,00
Санкт-Петербург	Новый Порт-эксп, Новый порт, Автово-эксп, Автово-перев, Автово	25,6	39,88
Усть-Луга	Лужская-эксп, Лужская	92,0	75,00
ММПК «Бронка»	Бронка-эксп, Бронка		
Мурманск	Мурманск-эксп, Мурманск-перев, Мурманск	18,1	621,42
Кандалакша	Кандалакша-эксп, Кандалакша-перев, Кандалакша	2,0	56,00

Источник: анализ и расчеты авторов по данным открытых источников.

Расчет проведен по показателям: «грузооборот». «объем грузовых перевозок», «структура грузопотоков», «пропускная и провозная способность железных дорог».

Базовым расчетным показателем принят «*грузооборот*». Анализ его динамики за 2023 г. по морскому порту «Усть-Луга» показал рост в 135% по сравнению с 2021 г. при этом, смещение цепей поставок изменило структуру грузов, обрабатываемых крупнейшими стивидорами, приведенными ниже, показало следующую динамику к 2022 г. [14]:

- АО «Усть-Луга Ойл»: 23/22 млн т,
- ООО «Ультрамар»: 14/2 млн т,
- ООО «Европейский серный терминал»: 8/7 млн т,
- ООО «Портэнерго»: 5/4 млн т,
- АО «Усть-Лужский контейнерный терминал»: 2/1,92 млн т,
- Усть-Лужское управление Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт»: 2/1 млн т.

При анализе показателя «*объем грузовых перевозок*» с точки зрения видов перевозок (внешнеторговые перевозки – экспорт, импорт и транзит, а также внутренние перевозки) было выявлено, что наибольшие доли в структуре грузовых перевозок как в 2022 г., так и в 2023 г. в целом составляют экспорт (49% в 2022 г. при средней доле за период в 55%) и внутренние перевозки (41% и 39% соответственно).

Наблюдается объективное сокращение доли экспорта и увеличение долей других видов перевозок.

В период изменения цепей поставок основными видами грузов, (показатель «структура грузопотоков») составляющими погрузку по ОЖД, являются строительные, рудные, нефтяные и удобрения. Их доля в погрузке 2022 г. составляла 81,4% (в целом, за период 2018–2022 гг. составляла 79,6%). В период с 2022 г. выросли объемы их погрузки, при этом, лесные грузы и руда железная и марганцевая показали падение. Следует отметить, что показатель «структура погрузки» отличается от показателя «структуры объемов перевозок в разрезе видов грузов». Так, в общем объеме погрузки совокупная доля 4-х видов грузов (строительных грузов, руды железной и марганцевой, химических и минеральных удобрений) практически в два раза выше, чем в целом по объему перевозок (68,7% против 38,1% соответственно). А доля нефти и нефтепродуктов в объеме погрузки, наоборот ниже, чем в целом по объему перевозок (10,9% и 21,8% соответственно).

В целях повышения устойчивости российской экономики в условиях ограниченности внешнеторговых операций ключевым вектором логистики перевозок по полигону ОЖД является использование потенциала МТК «Север-Юг».

Актуальным остается вопрос развития инфраструктуры МТК «Север-Юг», о чем свидетельствует подписанное 17 мая 2023 г. соглашение о строительстве участка железной дороги «Решт-Астара», как части МТК «Север-Юг», проходящего от г. Санкт-Петербург до МП «Мумбаи» в Индии. Согласно данным доклада Евразийского банка реконструкции и развития, использование инфраструктуры полигона ОЖД по МТК «Север-Юг» позволит перевозить грузы в контейнерах в международном сообщении, тем самым увеличивая объемы перевозок [15].

В результате трансформации международной логистики и приостановки работы крупнейших грузоперевозчиков («Maersk», «MSC», «СМА» и пр.) в 2022 г. в морских портах СЗФО наблюдалось значительное сокращение контейнерного грузооборота, сопровождающегося снижением уровня показателя провозной способности. Тем не менее, в конце 2023 г. объема перевозимых грузов по МТК увеличились за счет роста пропускной способности морских линий:

- перевозки угля в Марокко, Турцию, Израиль, Индию, Китай;
- контейнерных грузов в порт г. Стамбул;
- перевозки сельхозпродукции из стран Латинской Америки и стран Карибского бассейна в МП «Усть-Луга» и «Бронка» [16].

В целом, перспективы роста грузопотоков подтверждаются статистическими данными роста объемов производств в 2023–2024 гг.

основных производителей и потребителей грузов, как в самом СЗФО, так и проходящих транзитом, в т.ч. в МТК. В расчетах данного исследования учтены, подтвержденные ОЖД, заявляемые плановые объемы перевозки и перевалки основных видов грузов на припортовых станциях за период с 2024 по 2025 гг. в следующих объемах:

- каменного угля более 80 млн т – 142%,
- удобрений (химических и минеральных) до 43 млн т – 189,4%,
- нефти и нефтепродуктов – 56,4 млн т – 105,8%¹.

Следует отметить, что крупнейшие транспортные компании-перевозчики адаптируются к работе в новых условиях – развивают новые линии и запускают модифицированные логистические сервисы (такие как: цифровые платформы, технологии распределенного реестра и блокчейн при прохождении пограничных пунктов и пр.), что позволяет восстанавливать докризисные объемы перевозимых грузов через порты Северо-Запада, не снижая актуальности развития транспортной инфраструктуры региона [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование представляет собой законченный фрагмент обоснования проектов развития железнодорожной инфраструктуры с учетом загрузки морских портов. Проблема развития транспортной инфраструктуры в период глобальных изменений должна рассматриваться как комплексная задача государственного значения. Периоды снижения перевозок и погрузки грузов не должны изменять планы по усилению сложной железнодорожной и морской инфраструктуры, так как их нереализация в будущем может повлечь ограничения в перевозках. Для повышения достоверности принятия решений о реализации проектов развития транспортной инфраструктуры СЗФО в данной статье предлагается надежный инструментарий анализа и прогнозирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор) на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения.

¹ Данные аналитического отчета, выполненного авторами в рамках государственного задания Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор).

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. Федорова М.Н., Егоров Ю.В. Совершенствование стратегических направлений развития железнодорожного транспорта РФ в условиях изменения геополитической ситуации. В кн.: Мобильность будущего – инновационная мобильность сетей поставок Северо-Западного региона: Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01 декабря 2022 года / Под редакцией Н.А. Журавлевой. СПб: ООО «Институт независимых социально-экономических исследований – оценка», 2022. С. 115–127. EDN LUGMCA
2. Гулый И.М. Трансформация российского рынка контейнерной логистики в новых геоэкономических условиях // Экономика устойчивого развития. 2022. № 4(52). С. 38–40. doi: 10.37124/20799136_2022_4_52_38 EDN RESMYS
3. Бородин А.Ф. Взаимодействие и развитие железнодорожных узлов Центра и Северо-Запада сети ОАО «РЖД» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2023. № 8–1. С. 44–61 EDN KIRMLD
4. Гулый И.М. Тенденции посткризисного восстановления портов Балтийского бассейна // Экономика устойчивого развития. 2023. № 3 (55). С. 22–27. Дата обращения: 02.11.2024. Режим доступа: http://www.economdevelopment.ru/ru_archive/issue55/
5. Операционные результаты «Северстали» за 4 кв. и 12 мес. 2022 г. [internet] Дата обращения: 02.11.2024. Режим доступа: <https://severstal.com/rus/media/archive/operatsionnye-rezultaty-severstali-za-4-kv-i-12-mes-2022-goda/>
6. ФосАгро публикует операционные и финансовые результаты за 12 месяцев 2022 г. Дата обращения: 14.11.2024. Режим доступа: <https://www.phosagro.ru/press/company/fosagro-publikuet-operatsionnye-i-finansovye-rezultaty-za-12-mesyatsev-2022-g/>
7. «Северсталь» в связи с масштабной инвестиционной программой наращивает объем закупок в Вологодской области. Дата обращения: 14.11.2024. Режим доступа: <https://severstal.com/rus/media/archive/severstal-v-svyazi-s-masshtabnoy-investitsionnoy-programмой-narashchivaet-obem-zakupok-v-vologodskoy/>
8. ПАО «Уралкалий». Развитие. Сотрудничество. Безопасность. Годовой отчет. Дата обращения: 14.11.2024. Режим доступа: https://www.uralkali.com/upload/iblock/99f/n6ei7p78bh3xab0z6wuuc6p6dxfxep9a/uralkali_ar2023_rus.pdf
9. Чеченова Л.М. Перспективы транспортировки грузов в границах стран пространства 1520 // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 133–146. doi: 10.20295/2223-9987-2023-1-133-146 EDN QHBFHO

10. Чеченова Л.М. Оценка эффективности контейнерных грузоперевозок в условиях роста мобильности цепей поставок // Экономика железных дорог. 2022. № 12. С. 53–61. EDN YBLAQT
11. Zhuravleva N., Chechenova L. Analytical model of reliability of the freight rail transportation forecasting system // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. doi: 10.1051/e3sconf/202346006043 EDN LBWRYK
12. Погрузка на Октябрьской железной дороге составила 93,4 млн тонн в январе-ноябре 2024 г. Дата обращения: 14.11.2024. Режим доступа: <https://ozd.rzd.ru/ru/4009/page/2452802?id=309628&ysclid=m4i9hdhry1106111296>
13. Митусова А.В., Дмитриева Е.В. Подходы к прогнозированию региональных железнодорожных перевозок в разрезе укрупненной номенклатуры грузов // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2023. № 8–2. С. 54–58. EDN EJSHPY
14. Журавлева Н.А., Никитин А.Б., Чеченова Л.М. Обеспечение экономической безопасности маневрового оператора порта на основе роста инвестиционного потенциала деятельности // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 4. С. 94–107. doi: 10.17816/transsyst20239494-107 EDN OLNKPE
15. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север–Юг». Дата обращения: 14.11.2024. Режим доступа: <https://1economic.ru/lib/117073>
16. Гулый И.М. Перспективы развития перевозок грузов по маршрутам мультимодального международного транспортного коридора «Север–Юг» // Экономика Центральной Азии. 2022. Т. 6, № 4. С. 341–354. doi: 10.18334/asia.6.4.117073
17. Курдюкова, А.В., Кувшинов М.Ю. Разработка технологического раздела Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» и алгоритма отбора технических и технологических решений // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2024. № 9. С. 16–30. EDN QLOHIF

REFERENCES

1. Fedorova MN, Egorov YuV. Improving the strategic directions for the development of railway transport in the Russian Federation in the context of a changing geopolitical situation. In: *Mobility of the future – innovative mobility of supply networks in the North-West region: Collection of scientific articles from the international scientific and practical conference, St. Petersburg, December 01, 2022 / Edited by N.A. Zhuravleva*. St. Petersburg: ООО «Institut nezavisimyykh sotsialno-ekonomicheskikh issledovaniy – otsenka»; 2022;115–127. (In Russ.) EDN LUGMCA
2. Guly IM. Transformation of the Russian container logistics market in new geo-economic conditions. *Economics of sustainable development*. 2022;4(52):38–40. (In Russ.) doi: 10.37124/20799136_2022_4_52_38 EDN RESMYS
3. Borodin AF. Interaction and development of railway junctions of the Center and North-West of the network of JSC Russian Railways. *Bulletin of the Academic Council of JSC IERT*. 2023;8–1:44–61. (In Russ.) EDN KIRMLD

4. Gulyi IM. Trends in post-crisis recovery of the Baltic ports. *Sustainable Development Economy*. 2023;3(55):22–27. (In Russ.) Accessed: 02.11.2024 Available from: http://www.economdevelopment.ru/ru_archive/issue55/
5. Operacionnyye rezul'taty «Severstali» za 4 kv. i 12 mes. 2022 g. [Internet] (In Russ.) [cited: 14.11.2024]. Available from: <https://severstal.com/rus/media/archive/operatsionnyye-rezultaty-severstali-za-4-kv-i-12-mes-2022-goda/>
6. FosAgro publikuet operacionnyye i finansovyе rezul'taty za 12 mesjacev 2022 g. [Internet]. (In Russ.) [cited: 14.11.2024]. Available from: <https://www.phosagro.ru/press/company/fosagro-publikuet-operatsionnyye-i-finansovyе-rezultaty-za-12-mesyatsev-2022-g/>
7. «Severstal`» v svyazi s masshtabnoj investicionnoj programmoj narashhivaet ob`em zakupok v Vologodskoj oblasti. [Internet] (In Russ.) [cited 2024 November 24]. Available from: <https://severstal.com/rus/media/archive/severstal-v-svyazi-s-masshtabnoj-investitsionnoj-programmoj-narashchivaet-obem-zakupok-v-vologodskoy/>
8. PAO «Uralkalij». Razvitie. Sotrudnichestvo. Bezopasnost`. Godovoj otchet. [Internet]. (In Russ.) [cited: 14.11.2024]. Available from: https://www.uralkali.com/upload/iblock/99f/n6ei7p78bh3xab0z6wuuc6p6dxfxep9a/uralkali_ar2023_rus.pdf
9. Chechenova LM. Prospects for cargo transportation within the borders of the 1520 space countries. *Bulletin of scientific research results*. 2023;1:133–146. doi: 10.20295/2223-9987-2023-1-133-146 (In Russ.) EDN QHBFHO
10. Chechenova LM. Evaluation of the efficiency of container cargo transportation in the context of increasing supply chain mobility. *Railway Economics*. 2022;12:53–61. (In Russ.) EDN YBLAQT
11. Zhuravleva N, Chechenova L. Analytical model of reliability of the freight rail transportation forecasting system. *E3S Web of Conferences*. 2023;460. doi: 10.1051/e3sconf/202346006043 EDN LBWRYK
12. Pogruzka na Oktyabr'skoj zheleznoj doroge sostavila 93,4 mln tonn v yanvare-noyabre 2024 goda. [Internet]. (In Russ.) [cited: 14.11.2024]. Available from: <https://ozd.rzd.ru/ru/4009/page/2452802?id=309628&ysclid=m4i9hdhry1106111296>
13. Mitusova AV, Dmitrieva EV. Approaches to forecasting regional rail transportation in the context of an aggregated nomenclature of goods. *Bulletin of the Academic Council of JSC IERT*. 2023;8-2:54-58. (In Russ.) EDN EJSHYP
14. Zhuravleva NA, Nikitin AB, Chechenova LM. Ensuring economic security of a port shunting operator based on the growth of investment potential of activities. *Innovative transport systems and technologies*. 2023;9(4):94–107. doi: 10.17816/transsyst20239494-107 (In Russ.) EDN OLHKPE
15. Perspektivy` razvitiya perevozok грузов po marshrutam mul'timodal'nogo mezhdunarodnogo transportnogo koridora “Sever–Yug” [Internet]. (In Russ.) [cited 2024 November 29]. Available from: <https://1economic.ru/lib/117073>
16. Gulyy IM. Prospects for the development of cargo transportation along the International North–South Transport Corridor. *Journal of Central Asia Economy*, 6(4), 341–354. doi: 10.18334/asia.6.4.117073

17. Kurdyukova AV, Kuvshinov MYu. Development of the technological section of the General Scheme for the development of the railway network of JSC Russian Railways and the algorithm for selecting technical and technological solutions. *Bulletin of the Academic Council of JSC IERT*. 2024;9:16–30. (In Russ.) EDN QLOHIF

Сведения об авторах:

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

Крюкова Татьяна Анатольевна, начальник Управления экономики
железнодорожного транспорта ИПЭБУ;
ORCID: 0009-0003-7929-1380;
E-mail: vtorm2012@mail.ru

Новикова Елена Владимировна, главный специалист отдела методологии
бюджетирования и ценообразования Управления экономики железнодорожного
транспорта ИПЭБУ;
ORCID: 0009-0009-0117-337X;
E-mail: epebu@mail.ru

Information about the authors:

Natalya A. Zhuravleva, Doctor of Economics, Professor, Director of IPEBU;
eLibrary SPIN: 8599-5636; ORCID: 0000-0003-3566-9225; Scopus ID: 56583893700;
E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Tatyana A. Kryukova, Head of the Economics Department;
ORCID: 0009-0003-7929-1380;
E-mail: vtorm2012@mail.ru

Elena V. Novikova, Chief Specialist of the Department of Methodology of budgeting
and Pricing of the Department of Economics of Railway Transport IPEBU;
ORCID: 0009-0009-0117-337X
E-mail: epebu@mail.ru