

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: transsys@mail.ru
WEB: www.transsys.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. выдан
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://transsys.ru/>
Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://transsys.ru/transsys/about/submissions>

ISSN 2782-3733 (Online)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 11 | № 2 | 2025

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

**"MODERN TRANSPORTATION
SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"**

Electronic peer-reviewed research journal
Issued 4 times a year (quarterly)
Established in 2013

INDEXING

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

CONTACTS

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

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

AIMS & SCOPE

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

JOURNAL CONTENT SELECTION

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

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 11 | Issue 2 | 2025

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Tamila S. Titova

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

Deputy EDITOR-IN-CHIEF

Sergey A. Smirnov

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

THE SCIENTIFIC EDITOR

Viktor V. Nikitin

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Aleksandr P. Ledyayev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Tunnels
and Subways, Leading Research Fellow Scientific and Analytical Group for the Development of Urban
Transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;

Zhixun Ma, PhD, Associate Professor, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D
Center (NMTC), Tongji University, Shanghai, China;

Radik R. Mulyukov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Physics
and Mathematics, Director of Superplasticity Metals Institute for Metals Superplasticity Problems at RAS,
Ufa, Russia;

Fei Ni, PhD, Assistant Researcher, National Maglev Transportation Engineering Technology R&D Center,
Tongji University, Shanghai, China;

Vladimir A. Nikitenko, Dr. Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Physics
Russian University of Transport, Moscow, Russia;

Viktor A. Podgorin, 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

Никитин В.В., Горский А.Н.

Электромагнитная безопасность высокоскоростного транспорта.....169

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

Изварин М.Ю.

Специфика роста протяженности ВСМ в мире на примере Японии.....185

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

Юницкий А.Э., Цырлин М.И., Малахов Р.А., Петровец А.Н.

Применение транспортных комплексов uST в условиях вечной мерзлоты202

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Ким К.К., Иванов С.Н., Щетинин С.И.

Прогнозирование работоспособности удаленных изоляционных систем219

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Карпова И.М.

Исследование сопротивления заземлителей с учетом нелинейности свойств грунта230

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Монастырский Д.Я., Киселев И.Г.

Эффективность применения утилизации холода СПГ в автономных рефрижераторных контейнерах246

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Середа Е.Г., Соловьев А.С.

Определение неисправностей асинхронных двигателей с помощью алгоритмов машинного обучения261

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Ткачук А.А.

Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами при токовых перегрузках273

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Шатохин В.А., Чернов Е.К.

Обеспечение функционирования реле контроля напряжения фидера электропитания при отклонении гармонического состава напряжения электропитания от нормативных значений291

СОДЕРЖАНИЕ

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Трифонов Б.А., Середа Г.Е.

Расчет тока нагрузки автономного инвертора напряжения методом гармонического анализа.....307

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Кузнецов А.А., Пономарев А.В.

Проектирование автоматизированной системы мониторинга состояний силовых трансформаторов.....318

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

Мартirosян И.В., Стариковский А.С., Балакина М. В., Покровский С.В.

Моделирование магнито-левитационных характеристик опорного магнитного подшипника
на основе стоек композитных ВТСП лент.....332

CONTENTS

REVIEWS

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Nikitin V.V., Gorsky A.N.

Electromagnetic Field Safety of High-Speed Vehicles169

ORIGINAL STUDIES

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

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

Izvarin M.Yu.

Special Aspects of Expansion of Global High-Speed Railways: A Study of Japan.....185

Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

Unitsky A.E., Tsyrlin M.I., Malakhov R.A., Petrovets A.N.

Use of uST Transport Systems in Permafrost Conditions.....202

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Kim K.K., Ivanov S.N., Shchetinin S.I.

Predicting the Performance of Remote Insulation Systems.....219

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Karpova I.M.

Grounding Resistance: A Study Based on Nonlinearity of Soil Properties230

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Monastyrsky D.Ya., Kiselev I.G.

Efficiency of LNG Cold Energy Recovery in Standalone Refrigerated Containers.....246

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Sereda E.G., Solovyov A.S.

Asynchronous Motor Fault Detection Using Machine Learning Algorithms261

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Tkachuk A.A.

Three-Phase Transformer With Stabilizing Properties at Overload Currents273

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Shatohin V.A., Chernov E.K.

Ensuring the Operability of Feeder Voltage Control Relay When Power Supply Voltage
Harmonics Deviate From Standard Values291

CONTENTS

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Subject – Electrotechnical complexes and systems
Trifonov B.A., Sereda G.E.
Calculation of Load Current of Self-Excited Voltage Inverter by Harmonic Analysis.....307

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Subject – Electrotechnical complexes and systems
Kuznetsov A.A., Ponomarev A.V.
Design of Automated System to Monitor Power Transformer States318

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics
Martirosian I.V., Starikovski A.S., Balakina M.V., Pokrovskii S.V.
Magnetic Levitation Modeling of Support Magnetic Bearing Based
on Stacks of Composite HTS Tapes332

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681997>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© **В.В. Никитин, А.Н. Горский**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА

Развитие высокоскоростного пассажирского сообщения связано с ростом мощности систем тягового электроснабжения и тягового электропривода подвижного состава, при этом увеличивается напряженность электрических и магнитных полей и их влияние на пассажиров, обслуживающий персонал, прочее оборудование, системы автоматики и связи. По этой причине оценка электромагнитной обстановки вблизи трасс высокоскоростного сообщения и внутри кузова подвижного состава в зонах размещения пассажиров, персонала и оборудования, а также задача обеспечения электромагнитной совместимости оборудования становятся актуальными проблемами, которые необходимо решать на этапе принятия технических решений и проектирования высокоскоростных транспортных систем.

В статье приведены значения предельно допустимых уровней электромагнитных полей, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами, а также представлены значения напряженности электрических и магнитных полей систем тягового электроснабжения и бортового силового электрооборудования высокоскоростного подвижного состава железных дорог и магнитолевитационного транспорта, рассмотрены способы обеспечения электромагнитной безопасности и совместимости указанных систем и оборудования.

Ключевые слова: высокоскоростной подвижной состав; электромагнитные поля; предельно допустимые уровни; электромагнитная безопасность.

Как цитировать:

Никитин В.В., Горский А.Н. Электромагнитная безопасность высокоскоростного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 169–185. doi: 10.17816/transsyst681997

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© V.V. Nikitin, A.N. Gorsky

Emperor Alexander I St.-Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**ELECTROMAGNETIC FIELD SAFETY
OF HIGH-SPEED VEHICLES**

The development of high-speed passenger transportation is a result of increased capacity of traction power supply systems, traction electric drives of rolling stock, and the intensity of electric and magnetic fields and their influence on passengers, maintenance staff, other equipment, and automation and communication systems. In the premises, we shall solve urgent problems, i.e. assess the electromagnetic environment near high-speed railway routes and inside the rolling stock in areas, where passengers, staff, and equipment are located, and ensure electromagnetic compatibility of equipment, at the stage of engineering decision-making and designing high-speed networks.

The paper presents the maximum permissible levels of electromagnetic fields provided by national and foreign regulations and the intensity of electric and magnetic fields of traction power supply systems and on-board power supply equipment of high-speed railways and magnetic levitation transportation systems. In addition, it reviews electromagnetic safety and compatibility of these systems and equipment.

Keywords: high-speed rolling stock; electromagnetic fields; maximum permissible levels; electromagnetic safety.

To cite this paper:

Nikitin VV, Gorsky AN. Electromagnetic Field Safety of High-Speed Vehicles. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):169–185. doi: 10.17816/transsyst681997

ВВЕДЕНИЕ

Развитие скоростного и высокоскоростного железнодорожного и магнитолевитационного транспорта, рост спроса на пассажирские перевозки связаны с увеличением мощности подвижного состава и систем электроснабжения. В настоящее время мощности высокоскоростных электропоездов достигают уровня 10–20 МВт в зависимости от развиваемой скорости и составности поезда (Табл. 1). При питании однофазным переменным током напряжением 25 кВ – это соответствует токам системы тягового электроснабжения 500...1000 А. В звене постоянного тока систем тягового электропривода, где напряжение понижается до уровня порядка 2000 В, токи могут достигать 250...500 А, а в пусковых режимах и большего значения. Подводя итог вышесказанному следует отметить актуальность проблемы исследования электромагнитной обстановки вблизи линий высокоскоростного транспорта, внутри пассажирских салонов и в зонах размещения бортового оборудования высокоскоростного подвижного состава.

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых серий высокоскоростного подвижного состава железнодорожного и магнитолевитационного транспорта [1–9]

Table 1. Main technical characteristics of some series of high-speed rolling stock for railway and magnetic levitation transport [1–9]

Серия подвижного состава	Скорость, км/ч	Число вагонов в составе	Система питания	Мощность, кВт
Sm6 Allegro	220	7	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	5 500
Talgo 250	250	8	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	4 800
ЭВС1, ЭВС2	250	10	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	8 000
CRH5	250	8	25 кВ, 50 Гц	5 500
Серия 700	285	16	25 кВ, 60 Гц	13 200
Серия 500	300	16	25 кВ, 60 Гц	18 200
TGV Atlantique	300	12	15 кВ, 16,7 Гц / 25 кВ, 50 Гц	8 800
Talgo 350	350	14	25 кВ, 50 Гц	8 000
ICE3	380	8	15 кВ, 16,7 Гц / 25 кВ, 50 Гц 1,5 кВ; 3 кВ	8 000
CRH380D	380	8	25 кВ, 50 Гц	10 000
Transrapid*	450	5	20 кВ; 1,5 кВ, 0...300 Гц	13 300
MLU-L0*	500	5	12,7 кВ, 0...500 Гц	13 600

Примечание: *) – подвижной состав на магнитном подвесе.

НОРМАТИВЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В настоящее время в различных странах действуют нормативные документы, которые определяют допустимые уровни напряженности электрических и магнитных полей. В Табл. 2 приведены предельные значения напряженности переменных электрических и магнитных полей, установленные международной комиссией по защите от неионизирующих излучений ICNIRP, для широкого частотного диапазона $1 \dots 10^6$ Гц в зависимости от локального или общего характера воздействия на организм человека. В Германии действует стандарт BImSchV26 (Табл. 3), устанавливающий допустимые значения напряженности электрического поля и магнитной индукции для постоянных и переменных полей частотой до 10 МГц.

В Российской Федерации приняты санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», которые устанавливают требования к безопасным условиям воздействия

Таблица 2. Предельные нормативные значения напряженности электрических и магнитных полей частотного диапазона 1 Гц–10 МГц по стандарту ICNIRP [10]

Table 2. Maximum standard values of electric and magnetic field strength in the frequency range 1 Hz–10 MHz according to the ICNIRP standard [10]

Диапазон частот	Напряженность электрического поля, кВ/м	Напряженность магнитного поля, А/м	Индукция магнитного поля, Тл
<i>Локальное воздействие</i>			
1...8 Гц	20	$(1,63 \cdot 10^5)/f^2$	$0,2/f^2$
8...25 Гц	20	$(2 \cdot 10^4)/f$	$(2,5 \cdot 10^{-2})/f$
25...300 Гц	$500/f$	$8 \cdot 10^2$	$(1 \cdot 10^{-3})$
300 Гц...3 кГц	$500/f$	$(2,4 \cdot 10^5)/f$	$0,3/f$
3 кГц...10 МГц	0,17	80	$1 \cdot 10^{-4}$
<i>Общее воздействие</i>			
1...8 Гц	5	$(3,2 \cdot 10^4)/f^2$	$(4 \cdot 10^{-2})/f^2$
8...25 Гц	5	$(4 \cdot 10^3)/f$	$(5 \cdot 10^{-3})/f$
25...50 Гц	5	$1,6 \cdot 10^2$	$(2 \cdot 10^{-4})$
50...400 Гц	$(2,5 \cdot 10^2)/f$	$1,6 \cdot 10^2$	$(2 \cdot 10^{-4})$
400 Гц...3 кГц	$(2,5 \cdot 10^2)/f$	$(6,4 \cdot 10^4)/f$	$(8 \cdot 10^{-2})/f$
3 кГц...10 МГц	$8,3 \cdot 10^{-2}$	21	$(2,7 \cdot 10^{-5})$

Таблица 3. Предельные нормативные значения электрической напряженности и магнитной индукции внешних полей различных частот по стандарту BlmSchV26 (Германия) [11]

Table 3. Maximum standard values of electrical intensity and magnetic induction of external fields of different frequencies according to the BlmSchV26 standard (Germany) [11]

Частота, Гц	Напряженность электрического поля, кВ/м	Магнитная индукция, мкТл
0	—	500
1...8	5	40 000/ f
8...25	5	5 000/ f
25...50	5	200
50...400	250/ f	200
400...3·10 ³	250/ f	80 000/ f
3·10 ³ ...10·10 ⁶	0,083	27

электростатического и магнитостатического полей, электромагнитных полей промышленной частоты, а также высокочастотных электромагнитных полей для лиц, профессионально связанных с воздействием данного фактора [12].

Для электростатических полей при продолжительности воздействия менее 1 часа установлен предельно допустимый уровень (ПДУ) $E_{\text{пду}}=60$ кВ/м, при более длительном воздействии ПДУ ниже и должен определяться в соответствии с [12]. При напряженности электростатического поля менее 20 кВ/м время пребывания персонала в таком поле не регламентируется.

Для постоянных магнитных полей (Табл. 4) нормирование осуществляется в зависимости от характера воздействия: общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье).

Таблица 4. Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля на рабочих местах [12]

Table 4. Maximum permissible levels of constant magnetic field in workplaces [12]

Время воздействия, мин.	ПДУ магнитной индукции, мТл	
	Общее воздействие	Локальное воздействие
Менее 10	30	50
11–60	20	30
61–480	10	15

ПДУ электрических полей промышленной частоты 50 Гц для длительности пребывания персонала в течение всей смены установлен $E_{\text{ПДУ}}=5$ кВ/м. При больших напряженностях поля, но не превышающих $E=20$ кВ/м, время пребывания должно быть ограничено и определено в соответствии с требованиями [12]. При напряженности электрического поля промышленной частоты $20 < E < 25$ кВ/м допустимое время пребывания не должно превышать 10 минут.

Для переменных магнитных полей промышленной частоты в зависимости от характера воздействия и длительности пребывания установлены следующие ПДУ (Табл. 5) [12].

Таблица 5. ПДУ синусоидального магнитного поля промышленной частоты 50 Гц

Table 5. Maximum permissible level of a sinusoidal magnetic field with an industrial frequency of 50 Hz

Время пребывания*, ч	ПДУ магнитной индукции, мкТл, при характере воздействия	
	Общем	Локальном
Менее 1 ч	2000	8000
2	1000	4000
4	500	2000
8	100	1000

*) ПДУ внутри указанных временных интервалов определяется путем интерполяции.

ПДУ электромагнитных полей в частотном диапазоне 10–30 кГц нормируется отдельно по электрической и магнитной компонентам напряженности и составляет: при воздействии в течение всей смены $E_{\text{ПДУ}}=500$ В/м, $H_{\text{ПДУ}}=50$ А/м; при воздействии не более двух часов за смену – $E_{\text{ПДУ}}=1000$ В/м, $H_{\text{ПДУ}}=100$ А/м.

ПДУ электромагнитных полей частотного диапазона 30 кГц – 300 ГГц рассчитывается с использованием понятий энергетической экспозиции и плотности потока энергии.

На Рис. 1 представлены нормативные значения ПДУ магнитных полей, устанавливаемые стандартами ICNIRP, BlmSchV26 и СанПиН 2.2.4.3359-16.

Анализ нормативных документов показывает, что ПДУ магнитных полей, устанавливаемые стандартом BlmSchV26, полностью совпадают

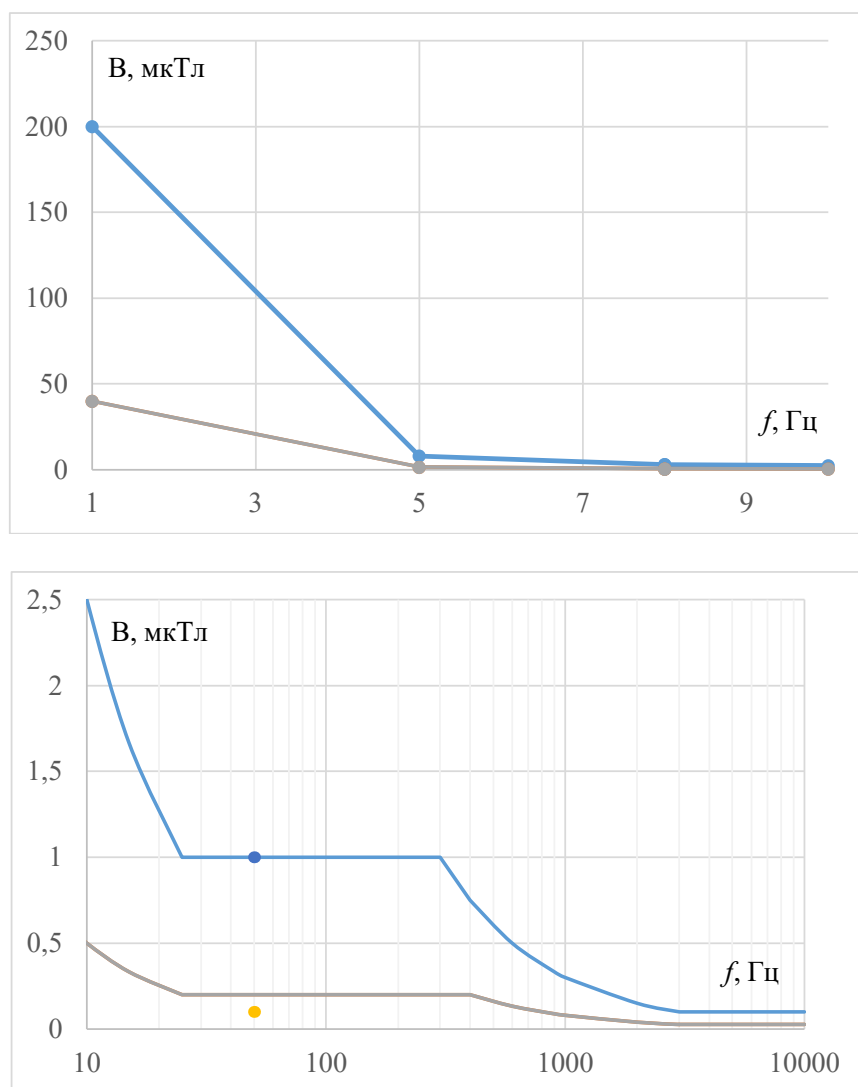


Рис. 1. ПДУ магнитных полей, устанавливаемых стандартами ICNIRP, BlmSchV26 в зависимости от частоты. Точки при частоте 50 Гц соответствуют ПДУ, установленным СанПиН 2.2.4.3359-16

Fig. 1. Maximum permissible levels of magnetic fields established by the ICNIRP, BlmSchV26 standards depending on frequency. The points at a frequency of 50 Hz correspond to the maximum permissible levels established by SanPiN 2.2.4.3359-16

с ПДУ, устанавливаемыми стандартом ICNIRP для общего характера воздействия. Требования СанПиН 2.2.4.3359-16 к магнитной индукции полей промышленной частоты соответствуют требованиям зарубежных стандартов в части локального воздействия; в части общего воздействия требования отечественного документа более строгие. Вместе с тем, СанПиН 2.2.4.3359-16 по сравнению с зарубежными стандартами BlmSchV26 допускает существенно более высокие значения постоянных

магнитных полей. Следует также отметить отличие подходов, принятых при разработке отечественных и зарубежных стандартов: в зарубежных стандартах нормируются ПДУ электрических и магнитных полей в зависимости от их частоты и характера воздействия (общее, локальное); в отечественном СанПиН 2.2.4.3359-16 ПДУ нормируется в зависимости от длительности пребывания в поле и характера воздействия (общее, локальное) для постоянных полей, полей промышленной частоты (50 Гц) и высокочастотных полей в диапазоне частот от 10 кГц и выше.

НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Исследования [11, 13] показали следующие уровни внешних полей контактной сети высокоскоростного наземного транспорта применительно к электропоезду ICE3 (платформа *Siemens Velaro*). При питании переменным током 25 кВ, 50 Гц на расстоянии 25 метров от контактного провода напряженность электрического поля составляет $E=1$ кВ/м (при допустимом значении 5 кВ/м). Для магнитного поля при токе 1700 А, что соответствует движению двух составов в режиме тяги на секции питания контактной сети при напряжении в контактном проводе 15 кВ, 16,7 Гц индукция составляет $B=13,6$ мкТл (при допустимом значении для этой частоты 300 мкТл). Пропорциональным пересчетом при условии инвариантности мощности можно получить значение магнитной индукции для напряжения 25 кВ, 50 Гц (при токе 1000 А) $B=8,2$ мкТл (при допустимом значении 200 мкТл).

Однако, наиболее интересны, вероятно, были бы данные, соответствующие существенно меньшему расстоянию от источника поля (контактного провода) до точки наблюдения по сравнению с данными, представленными в [11, 13]. Например, если точка наблюдения соответствует положению головы человека, стоящего на низкой платформе или пешеходном переходе, тогда для контактной сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц будем иметь такие значения: $E=5,9$ кВ/м (при допустимом значении 5 кВ/м); для тока в контактном проводе 1000 А магнитная индукция составит $B=47$ мкТл. Видно, что на таком расстоянии напряженность электрического поля может превышать нормативное значение. В том случае, если высокоскоростное движение осуществляется

на постоянном токе 3 кВ, магнитная индукция внешнего поля от системы тягового электроснабжения (ток в контактном проводе соответствует мощности 9000 кВт) на расстоянии 5 м от оси пути может достигать $B=500$ мкТл, что соответствует границе допустимых значений индукции постоянного магнитного поля. Следует заметить, что расчет проводился с учетом совместного влияния тока в контактном проводе и обратного тягового тока в рельсовых цепях. Наибольший вклад в уровень магнитной индукции в расчетных точках вносит не ток контактного провода, а обратный тяговый ток, замыкающийся по рельсовым цепям.

Уровни электромагнитных полей внутри кузова вагона рассчитать более сложно, т.к. они складываются из внешних полей многих источников, распределенных по длине секции высокоскоростного электропоезда, основными из которых являются элементы силового электрооборудования (тяговые трансформаторы, тяговые преобразователи, тяговые двигатели), и представляют собой суперпозицию как переменных полей изменяющихся частот, так и постоянных или пульсирующих полей [14–18].

В [11, 13] приведены следующие значения индукции внешних магнитных полей от различных элементов тягового электрооборудования высокоскоростного электропоезда ICE3 (Табл. 6).

Таблица 6. Максимальные значения индукции магнитного поля внутри кузова высокоскоростного электропоезда ICE3

Table 6. Maximum values of magnetic field induction inside the body of the high-speed electric train ICE3

Источник магнитного поля	Магнитная индукция, мкТл, на расстоянии, м, от источника поля			
	0,5	1,0	2,0	3,0
Тяговый преобразователь	405	198	100	60
Тяговый трансформатор	510	255	120	64
Тяговые двигатели	565	281	135	80

В работе [18] даны максимальные значения индукции постоянного магнитного поля, измеренные в различных точках внутри кузова пригородного моторвагонного подвижного состава в режиме остановки и движения (Табл. 7), а также зависимости магнитной индукции переменных полей частотного диапазона 5 Гц–20 кГц в контрольных точках.

Таблица 7. Максимальные значения магнитной индукции постоянного магнитного поля внутри кузова пригородного электропоезда

Table 7. Maximum values of magnetic induction of a constant magnetic field inside the body of a suburban electric train

Положение точки измерения	Максимальная магнитная индукция постоянного магнитного поля, мкТл		
	Высота точки измерения, м	Режим остановки	Режим движения
Кабина машиниста	0,9	220,1	237,4
	1,5	180,9	245,2
Пассажирский салон	0,9	266,6	280,1
	1,5	256,2	276,6

Результаты измерений, представленные в [11, 13, 15, 18], свидетельствуют о том, что уровни магнитных полей в пассажирском салоне и кабине машиниста железнодорожного подвижного состава не превышают установленных нормативных значений.

НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СИСТЕМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

В настоящее время практическое распространение получили две характерные технологии магнитного подвеса экипажей высокоскоростного транспорта: электромагнитное подвешивание (ЭМП) и электродинамическое подвешивание (ЭДП). Первый вариант использует в системе подвеса и поперечной стабилизации экипажа традиционные «теплые» электромагниты со стальными сердечниками; в системе линейной тяги используются асинхронные (*Linimo*, Япония; *Ecobee*, Южная Корея, линии в Пекине и Чанше, Китай) или синхронные (*Transrapid*, Китай) линейные двигатели. При втором варианте используются сверхпроводниковые магниты с высокими намагничивающими силами, расположенные на экипаже, которые одновременно выполняют функции источника поля возбуждения в линейном синхронном двигателе и системе подвешивания и поперечной стабилизации (полигон *Yamanashi*, серия *L0*, Япония), взаимодействуя с «теплыми» катушками, размещенными на путевом полотне [19–21].

Системы ЭМП характеризуются малыми воздушными зазорами в электромагнитах подвешивания, поперечной стабилизации и линейной

тяги (порядка 8...12 мм) и наличием стальных сердечников, в результате чего поля рассеяния относительно невелики. Непосредственные замеры вдоль путевого полотна системы *Transrapid* показали весьма небольшие значения индукции внешнего магнитного поля в окружающем пространстве, представленные в Табл. 8 [22].

Таблица 8. Индукция внешнего магнитного поля в окружающем пространстве для магнитолевитационной системы *Transrapid*

Table 8. Induction of the external magnetic field in the surrounding space for the *Transrapid* magnetic levitation system

Частотный диапазон, Гц	Индукция внешнего магнитного поля, мкТл		
	На оси путевого полотна	На расстоянии 3-4 м от оси путевого полотна	На расстоянии 10 м от оси путевого полотна
5 Гц...50 кГц	8	9,7	2,2
5...45 Гц	7	8,5	1,5
50...300 Гц	6,9	3,8	1,8
305...2560 Гц	0,5	0,1	0,1

Замеры внешних полей в салоне магнитолевитационного экипажа *Transrapid* (Табл. 9) показали более высокие значения индукции, которые, впрочем, не превышают установленных нормативных значений во всем частотном диапазоне и существенно меньше, чем магнитные поля силового электрооборудования высокоскоростного электропоезда ICE3 [22].

Таблица 9. Максимальные значения индукции магнитного поля внутри пассажирского салона экипажа *Transrapid*

Table 9. Maximum values of magnetic field induction inside the passenger cabin of the *Transrapid* vehicle

Частотный диапазон	Индукция внешнего магнитного поля, мкТл			
	Уровень пола пассажирского салона	Уровень поверхности пассажирского кресла	Уровень головы сидящего пассажира	Уровень головы стоящего пассажира
5 Гц...45 Гц	8,8	3,9	3,2	2,5
50 Гц...300 Гц	23,0	13,8	7,5	4,9
305 Гц...50 кГц	25,0	14,0	7,5	5,0

Магнитолевитационные транспортные системы на ЭДП с использованием сверхпроводниковых магнитов, размещенных на экипаже (*L0 Series*, полигон *Yamanashi*, Япония), характеризуются воздушными зазорами в системе тяги и подвеса на порядок больше (около 100...150 мм), чем при ЭМП, но отличаются существенно более высокими намагничивающими токами и внешними магнитными полями. В табл. 10 представлены результаты замеров индукции магнитного поля в пассажирском салоне экипажа *L0* [23].

Результаты замеров индукции магнитного поля [23] и хорошо согласующиеся с ними результаты численного моделирования магнитных полей [24] показывают, что в некоторых точках внутри пассажирского салона вблизи тягово-левитационного модуля со сверхпроводящими катушками магнитная индукция может превышать предельно допустимые нормативные значения (500 мкТл для постоянного магнитного поля) даже при наличии ферромагнитных экранов.

Таблица 10. Индукция магнитного поля в пассажирском салоне магнитолевитационного экипажа *L0 Series*, полигон *Yamanashi*

Table 10. Magnetic field induction in the passenger compartment of the *L0 Series* magnetic levitation vehicle, *Yamanashi* testing ground

Точка измерения	Уровень по высоте	Магнитная индукция*, мкТл
По центральной оси ряда пассажирских кресел	1 м над уровнем пола	116/88
	Уровень пассажирского кресла	96/64
	0,1 м над уровнем пола	112/58
По центральной оси прохода в салоне	1,5 м над уровнем пола	90/89
	0,1 м над уровнем пола	105/83
Над тягово-левитационным модулем	1 м над уровнем пола	1656/429
	Уровень пассажирского кресла	2697/382
	0,1 м над уровнем пола	1764/1061

*) в числителе – без экранирования; в знаменателе с ферромагнитным экранированием пассажирского салона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования напряженности электрических и магнитных полей силового электрооборудования высокоскоростного железнодорожного

транспорта показывают, что в непосредственной близости от контактной сети (в зоне допустимого расположения пассажиров и персонала) напряженность электрического поля переменного тока и магнитная индукция контактной сети постоянного тока могут превышать допустимые значения. Внутри пассажирского салона высокоскоростного железнодорожного подвижного состава наиболее выражены магнитные поля, индукция которых с учетом экранирующего действия элементов конструкции кузова не превышает допустимые значения.

Уровни магнитных полей в пассажирском салоне магнитолевитационных экипажей с электромагнитным подвешиванием не превышают допустимых значений и оказываются сравнительно меньше, чем в пассажирском салоне высокоскоростного железнодорожного подвижного состава. В пассажирском салоне магнитолевитационных экипажей с электродинамическим подвешиванием на основе сверхпроводниковых магнитов уровень внешних магнитных полей в некоторых локальных зонах может превышать допустимые значения. Защитное действие ферромагнитных экранов в этих зонах оказывается малоэффективным, что требует разработки дополнительных мер защиты пассажиров и персонала.

Насыщенность высокоскоростного подвижного состава железнодорожного и магнитолевитационного транспорта силовым и информационным электронным оборудованием обуславливает воздействие на пассажиров и персонал электромагнитных полей широкого частотного спектра. Учитывая последнее обстоятельство, необходимо совершенствование отечественной нормативной базы в части определения ПДУ не только для постоянных электрических и магнитных полей и полей промышленной частоты, но и полей в диапазоне частот 50 Гц–10 кГц. Действующими СанПиН 2.2.4.3359-16 для этого частотного диапазона ПДУ электромагнитных полей не установлены.

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. Киселев И.П., Назаров О.Н. Развитие высокоскоростного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 6. С. 68-77.
2. Киселев И.П., Назаров О.Н. Развитие высокоскоростного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7 С. 65-77.
3. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире // Транспорт Российской Федерации. 2012. Т. 40-41, № 3-4. С. 61-65.
4. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире // Транспорт Российской Федерации 2012. Т.42, № 5. С. 44-51.
5. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
6. Hellinger R., Engel M., Nothhaft J. Propulsion System and Power Supply for Transrapid Commercial Lines [Internet] Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <http://www.maglev.ir>
7. Kaga S., Murai T., Nakamichi Y., et. al. Characteristics of LSM Drive at the Yamanashi Maglev Test Line // QR of RTRI. 1998. Vol. 39, N 2. P. 68-73.
8. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023.
9. Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т.8, № 4. С. 91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106
10. ICNIRP Guidlines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields. Health Physics 2010. Vol. 99, N 6. P. 818-836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
11. Kircher R., Palka R., Fritz E., et al. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems. Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. The International Maglev Board. October 2018. [Internet]. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.maglevboard.net>
12. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16. «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/>
13. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 152-166. doi: 10.17816/transsyst201842152-166
14. Ким К.К., Карпова И.М. Электротехнические и тепловые расчеты с применением пакета ELCUT. Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта. В кн.: Межвузовский тематический сборник научных трудов. Омский государственный университет путей сообщения; под редакцией А. А. Кузнецова. Омск: ОмГУПС, 2011. С. 10-15.

15. Сергеевков Н.А., Горский А.Н., Васильев П.Ю. Экспериментальное исследование электромагнитных полей на электрическом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 2. С. 48-58. doi: 10.20295/2223-9987-2021-2-48-58
16. Аполлонский С.М., Горский А.Н., Никитин В.В. Проблемы электромагнитной безопасности в современных электроэнергетических системах железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 2. С. 43-47.
17. Pranay S, Perna S, Singh LP, Deswall SS. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling Stock // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013. Vol. 2, N 1. P. 22-27.
18. John L., Dluzniewski A. Measurements of the Magnetic Fields Generated by Electronic Devices Installed on Railways Rolling Stock // Problemy Kolejnictwa. 2018. Vol. 62, N 181. P. 99-106. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: https://problemykolejnictwa.pl/images/PDF/181_3E.pdf
19. Lee Y.W., Kim Ki.C., Lee J. Review of Maglev Train Technologies // IEEE Trans. On Magn. 2006. Vol. 42, N 7. P. 1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
20. Tomita M. Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity // QR of RTRI. 2023. Vol. 64, N 1. P. 11-15. doi: 10.2219/rtriqr.64.1_11
21. Han H.-S., Kim D.-S. Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications. New York: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-94-017-7524-3
22. Rausch C. ZEVrail, Glasers Annalen – Sonderheft Transrapid, 2003. [Internet]. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.zevrail.de>
23. Kircher R., Klühspies J., Fritz E., Witt M. Application Potential of Maglev Technology in Transport Systems. In: Proceedings of the 26th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Malmö, Sweden, 2024 Sept. 18-21. 2024. Vol. 2. P. 551-570.
24. Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 19-32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

REFERENCES

1. Kiselev IP, Nazarov ON. Development of high-speed rolling stock. *Railway Transport*. 2019;6:68-77; 2019;7:65-77. (In Russ).
2. Kiselev IP, Nazarov ON. Development of high-speed rolling stock. *Railway Transport*. 2019;7:65-77; 2019;7:65-77. (In Russ).
3. Kiselev IP. High-speed railway rolling stock and its development prospects. *Transport of the Russian Federation*. 2012;40-41(3-4):61-65. (In Russ).
4. Kiselev IP. High-speed railway rolling stock and its development prospects. *Transport of the Russian Federation*. 2012;42(5):44-51. (In Russ).
5. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic levitation transport technology*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ).

6. Hellinger R, Engel M, Nothhaft J. Propulsion System and Power Supply for Transrapid Commercial Lines [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <http://www.maglev.ir>
7. Kaga S, Murai T, Nakamichi Y, et. al. Characteristics of LSM Drive at the Yamanashi Maglev Test Line. *QR of RTRI*. 1998;39(2):68-73.
8. Kim KK. *Magnetic suspension and superconductivity electric propulsion systems*. Moscow: IPR Media; 2023. (in Russ).
9. Kim KK, Karpova IM. On the Issue of the Development of Permanent Magnet Suspension Systems for Transport Systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106.
10. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields. *Health Physics*. 2010;99(6):818-836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
11. Kircher R, Palka R, Fritz E, et al. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems. Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board*. October 2018 [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.maglevboard.net>
12. Sanitary and epidemiological rules and regulations SanPiN 2.2.4.3359-16. "Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace". (In Russ). Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/>
13. Kircher R, Klühspies J, Palka R, et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):152-166. (Russ., Engl.). doi: 10.17816/transsyst201842152-166
14. Kim KK, Karpova IM. *Electrical and thermal calculations using a software ELCUT*. Proceedings "Energosberegaushie tehnologii, control i upravlenie dla predpriatiy zheleznodorozhnogo transporta" Omsk: OmGUPS; 2011:10-15. (In Russ).
15. Sergeenkov NA, Gorskiy AN, Vasiliev PYu. Experimental studies of electromagnetic fields on electric rolling stock. *Bulletin of scientific research results*. 2021;2:48-58. (In Russ). doi: 10.20295/2223-9987-2021-2-48-58
16. Apollonsky SM, Gorsky AN, Nikitin VV. Problems of Electromagnetic Safety in Modern Electric Power Rail System. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2017;2:43-47. (In Russ).
17. Pranay S, Prerna S, Singh LP, Deswall SS. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling Stock. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013;2(1):22-27.
18. John L, Dluzniewski A. Measurements of the Magnetic Fields Generated by Electronic Devices Installed on Railways Rolling Stock. *Problemy Kolejnictwa*. 2018;62(181):99-106. Accessed: May 04, 2025. Available from: https://problemykolejnictwa.pl/images/PDF/181_3E.pdf
19. Lee YW, Kim KiC, Lee J. Review of Maglev Train Technologies. *IEEE Trans. On Magn*. 2006;42(7):1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
20. Tomita M. Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity. *QR of RTRI*. 2023;64(1):11-15. doi: 10.2219/rtriqr.64.1_11

21. Han H-S, Kim D-S. *Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications*. Springer. 2016. doi: 10.1007/978-94-017-7524-3
22. Rausch C. ZEVrail, Glasers Annalen – Sonderheft Transrapid, 2003. [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.zevrail.de>
23. Kircher R, Klühspies J, Fritz E, Witt M. Application Potential of Maglev Technology in Transport Systems. Proceedings of the 26th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Malmö, Sweden, 2024 Sept. 18-21. 2024;2:551-570.
24. Vataev AS, Dedova OA, Nikitin VV. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):19-32. (Russ., Engl). doi: 10.17816/transsyst20239219-32

Сведения об авторах:

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Горский Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 2519-1678, AuthorID: 915015;

E-mail: gorskyan38@mail.ru

Information about the authors:

Victor V. Nikitin, Dr. Sci. (Tech.), professor;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Anatoly N. Gorsky, Dr. Sci. (Tech.), professor;

eLibrary SPIN: 2519-1678, AuthorID: 915015;

E-mail: gorskyan38@mail.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst683382>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© М.Ю. Изварин

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

СПЕЦИФИКА РОСТА ПРОТЯЖЕННОСТИ ВСМ В МИРЕ НА ПРИМЕРЕ ЯПОНИИ

Обоснование. Одним из основных путей повышения эффективности работы железнодорожного транспорта является повышение скорости движения. При увеличении скорости сокращаются расходы на оплату труда персонала, уменьшается время оборота, за счет чего растут доходы. В области пассажирских перевозок наибольшую эффективность имеют высокоскоростные железные дороги, которые в России принято называть высокоскоростные магистрали (ВСМ). В последние 60 лет сеть ВСМ активно развивается в различных странах мира, что позволяет анализировать статистические данные об их строительстве и эксплуатации.

Цель. Выявить закономерности развития ВСМ, которые позволят оптимизировать технические решения в области высокоскоростного движения как при сооружении первой в России ВСМ Санкт-Петербург – Москва, а также при дальнейшем развитии сети ВСМ в России.

Материалы и методы. Статистика Международного союза железных дорог (МСЖД), Статистика национальных железнодорожных компаний. Математические методы – Метод наименьших квадратов, Метод ковариации, Метод корреляции Пирсона

Результат. Получено математическое описание роста протяженности ВСМ на примере Японии.

Заключение. Результат можно использовать для оценки развития ВСМ в различных странах мира.

Ключевые слова: высокоскоростные железные дороги (ВСМ); перспективы высокоскоростного транспорта; темпы строительства; эксплуатационная длина; страны-лидеры высокоскоростного движения.

Как цитировать:

Изварин М.Ю. Специфика роста протяженности ВСМ в мире на примере Японии // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 186–201. doi: 10.17816/transsyst683382

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

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

© **M.Y. Izvarin**

Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university
(St. Petersburg, Russia)

SPECIAL ASPECTS OF EXPANSION OF GLOBAL HIGH-SPEED RAILWAYS: A STUDY OF JAPAN

BACKGROUND. The main way to improve the performance of railway systems is to increase the speed. When increasing speed, we reduce labor costs, turnaround time and increase profit. In passenger transportation, the most efficient are high-speed railways (HSR, or *высокоскоростные магистрали* in Russian). Over the past 60 years, the high-speed railway network has been actively developing in various countries of the world, allowing to analyze statistics on their construction and operation.

AIM. To identify the patterns of high-speed railway development that will allow optimizing high-speed transportation solutions both during the construction of the first Russian HSR (St. Petersburg–Moscow) and further development of the HSR network in Russia.

MATERIALS AND METHODS. Statistics of the International Union of Railways (UIC); statistics of national railway companies. Mathematical methods include least square method, covariance method, and Pearson correlation analysis.

RESULTS. A mathematical description of HSR expansion was developed based on a case study of Japan.

CONCLUSION. The study may be used to assess the global development of HSRs.

Keywords: high-speed railways (HSR); high-speed transportation prospects; construction rates; operational length; leading countries in high-speed transportation.

To cite this paper:

Izvarin MYu. Special Aspects of Expansion of Global High-Speed Railways: A Study of Japan. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):186–201. doi: 10.17816/transsyst683382

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых эффективных видов транспорта является железнодорожный, который осуществляет как грузовые, так и пассажирские перевозки. Изначально пассажирские перевозки развивались такими же темпами, как и грузовые, причем даже несколько опережали последние.

Однако, с развитием других видов транспорта, прежде всего автомобильного и авиационного, пассажирские перевозки по железной дороге стали постепенно сокращаться. При этом существует одна область пассажирских перевозок, в которой протяженность линий и пассажирооборот неуклонно растет от года к году. Когда в 60-х гг. XX века перед железнодорожными компаниями встал вопрос о снижении экономической эффективности перевозок пассажиров, железнодорожные компании рассматривали 2 возможных сценария развития:

- первый из них состоял в сокращении пассажирской инфраструктуры, связанных с этим расходов и перевод железных дорог исключительно на прибыльные перевозки грузов. По такому пути пошли железнодорожные компании США, Канады, Австралии и ряда других государств. В этих странах перевозки пассажиров практически прекратились в 1970-х гг. и сейчас пассажирооборот составляет менее 1% от грузооборота, удерживаясь на постоянном низком уровне (остались пригородные перевозки и крайне ограничено – перевозки пассажиров в дальнем сообщении).
- второй заключался в кардинальном изменении железнодорожных перевозок с увеличением скоростей в разы, с целью создать конкурентные преимущества по сравнению с авиационным и автомобильным транспортом. Этот путь выбрали Япония, Франция, Германия, чуть позже – Испания. В последующем, в 80-х – 90-х гг. XX века к странам, развивающим пассажирские перевозки высокой скоростью, добавились ряд государств Европы, а с начала 2000-х годов еще и Китай.

В данной статье не рассматриваются физические и технические аспекты использования высокоскоростных поездов, возможность осуществления перевозок пассажиров со скоростями до 350–400 км/ч считается доказанной. Речь идет исключительно об тенденциях развития протяженности сети ВСМ в различных странах.

РАЗВИТИЕ ВСМ В МИРЕ

Пионером в развитии высокоскоростных перевозок выступает Япония, развивающая сеть Синкансен с 1964 года. Автор данной статьи длительное время собирал данные о строительстве ВСМ и наращивании протяженности сети, что позволило выявить ряд закономерностей по теме настоящего исследования. Если считать началом высокоскоростного движения на железных дорогах мира открытие линии «Синкансен» в Японии в 1964 г., то в 2024 году высокоскоростным линиям исполнилось 60 лет. К юбилею протяженность высокоскоростных линий выросла более, чем в 200 раз – с 285 км до более, чем 59 000. Однако в разных странах высокоскоростные линии строятся по-разному, протяженность и пассажирооборот растут неравномерно.

В соответствии с классификацией международного союза железных дорог (МСЖД) высокоскоростными называются железнодорожные линии, предназначенных для движения поездов со скоростями 250 км/ч и выше. В мире такие линии принято называть High Speed Lines. Во Франции для обозначения подобных линий используется обозначение LGV (Lignes à Grande Vitesse). В России в настоящее время подобных линий не существует, однако планируемые к постройке принято называть ВСМ.

Статистику протяженности линий ВСМ ведет ряд международных ассоциаций. К таковым относятся: Международный союз железных дорог (МСЖД) [1], Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД) и ряд других. Несмотря на то, что первой страной, построившей ВСМ, была Япония, в настоящее время темпы прироста высокоскоростных линий в этой стране существенно уступают Китаю [2] (Рис. 1). Разница настолько очевидна, что на графике по оси ординат приходится использовать логарифмическую шкалу, иначе невозможно визуально оценить прирост в остальных странах. По предварительным данным, протяженность ВСМ в Китае достигла к 2024 г. 48000 км.

Исследования, проведенные автором, показали, что несмотря на различные условия в разных странах существуют общие тенденции развития, позволяющие спрогнозировать перспективы развития ВСМ в той или иной стране. В то же время протяженность сети ВСМ в развитых странах подошла к своему пределу и дальнейшее наращивание протяженности (эксплуатационной длины) пока не происходит. Пока все причины этого явления не ясны окончательно, однако уже сейчас понятно, что это связано, прежде всего, с экономическими соображениями. Строительство ВСМ – крайне затратное мероприятие, обычно средняя стоимость одного

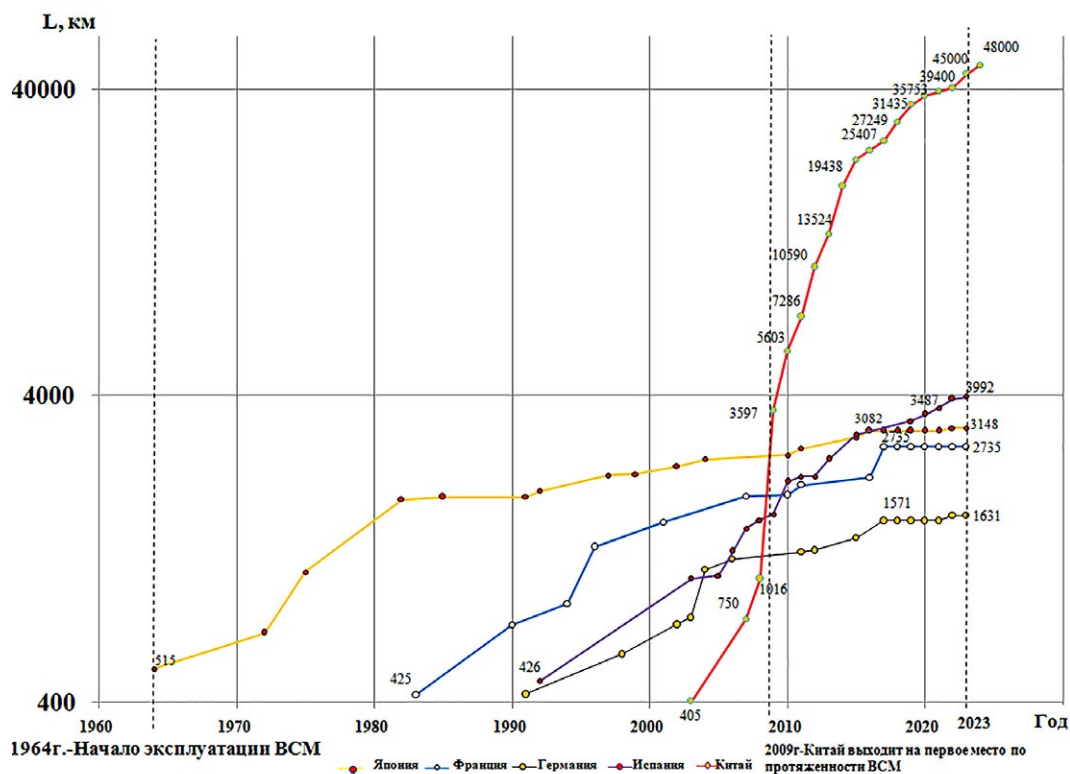


Рис. 1. Рост протяженности ВСМ в мире

Fig. 1. Increase in the length of high-speed railways

километра линии составляет от 4,5 до 25 млн Евро, в зависимости от технических условий и рельефа местности. Однако стоимость постройки ВСМ стремительно растет, итоговая цена за последние годы выросла в разы. Например, агентство CNN оценивает стоимость одной мили новой линии ВСМ HS2 в Великобритании между Лондоном и Бирмингемом в 416 млн долл. (258 млн долл. за км) при первоначальной цене 109 млн долл./км [5]. Экономическая эффективность перевозки пассажиров с высокой скоростью не только повышает конкурентоспособность железнодорожного транспорта по сравнению с другими видами, но и сама по себе имеет высокую экономическую эффективность за счет большой маршрутной скорости. Высокая скорость снижает время оборота, за счет чего количество рейсов за одно и то же время увеличивается, а вместе с ними растут доходы. Растет провозная способность участка, уменьшаются рабочие часы сотрудников локомотивной и поездной бригады. Однако, по сравнению с авиатранспортом, который нуждается в инфраструктурных объектах только в пунктах отправления и прибытия, а на протяжении маршрута – только в объектах аэронавигации, ВСМ

имеет большое количество высокозатратных инфраструктурных объектов не только на конечных станциях, но и на всем пути следования. Основную часть затрат составляют расходы на строительство объектов и пути, но и после окончания строительства, в отличия от воздушного транспорта, инфраструктура требует определенных затрат – необходима охрана объектов, контактную сеть нужно держать под напряжением даже при отсутствии поездов, что вызывает потери энергии. Также значительную часть расходов составляют затраты на оплаты труда дежурного персонала (диспетчера, дежурные по станциям, работники пассажирского комплекса). Поэтому ВСМ показывают хорошую экономическую эффективность только при некотором минимальном объеме движения. Если данный объем не обеспечить (что определяется спросом населения на перевозки по ВСМ), авиатранспорт становится эффективнее. В каждой стране экономическая ситуация различна, поэтому протяженность сети ВСМ также отличается. Первые опыты по движению электропоездов (точнее электровагонов, или мотрисс) с высокой скоростью проводились в Германии в первой половине XX века, на участке Мариенфельд – Цоссен, однако регулярное движение высокоскоростных поездов началось позднее – во второй половине XX века. В данной статье производится анализ роста протяженности ВСМ в странах, которые начали строить и вводить ВСМ первыми: Япония (с 1964 г.), Франция (с 1981 г.) и Германия (с 1991 г.) а также в Китае и Испании, подробно закономерности роста рассмотрены на примере Японии.

ДИНАМИКА РОСТА ПРОТЯЖЕННОСТИ ВСМ

Определить темпы роста можно, продифференцировав по времени кривые на Рис. 1. Так как строительство ВСМ процесс длительный, и линии в большинстве стран вводится не каждый год, для оценки темпов роста протяженности ВСМ нужно определить прирост за промежутки по 10 лет. При этом годовой прирост определяется делением полученной величины на число лет, за которые этот прирост учитывается (10), чтобы получить среднее арифметическое значение, либо использовать медианное значение.

Годовой прирост протяженности линий ВСМ представлены на Рис. 2.

Из Рис. 3 ясно, что кривые содержат значительные выбросы, связанные с неравномерностью ввода ВСМ в эксплуатацию, скрываемые за счет использования логарифмического масштаба. Чтобы оценить среднее значение прироста протяженности вводимых линий с высокоскоростным движением, данные представлены в виде гистограммы на Рис. 3.

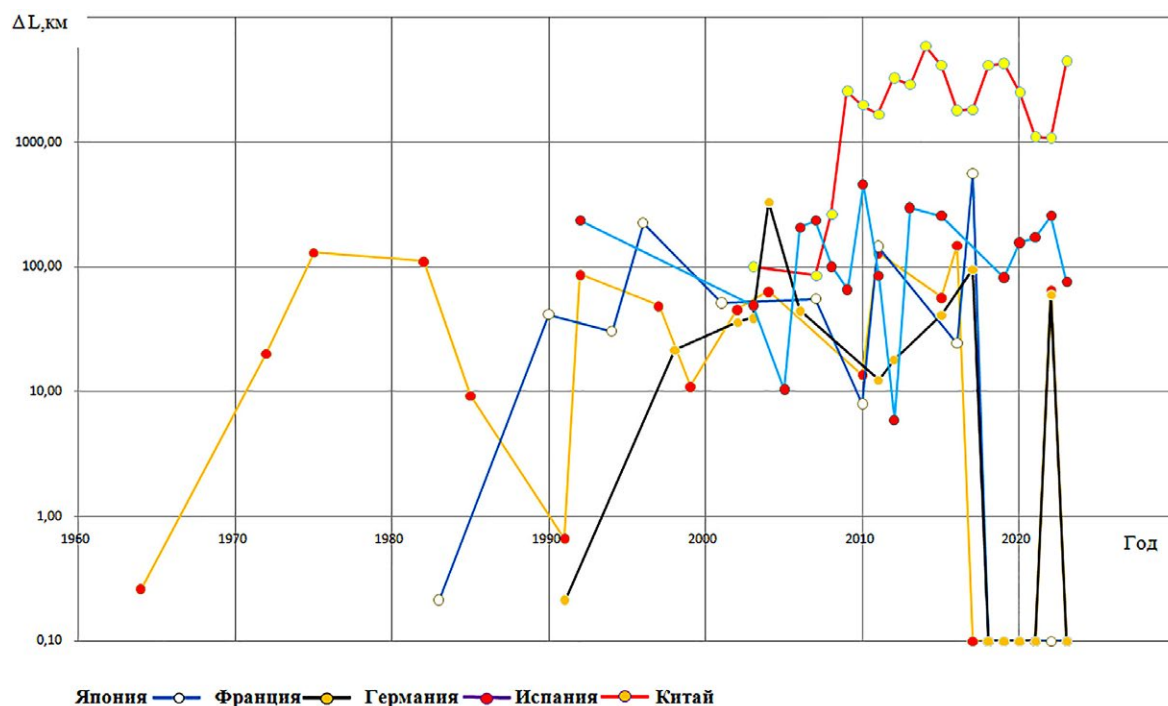


Рис. 2. Прирост протяженности ВСМ в логарифмических координатах

Fig. 2. Annual growth of the length of the high-speed railways in logarithmic coordinates

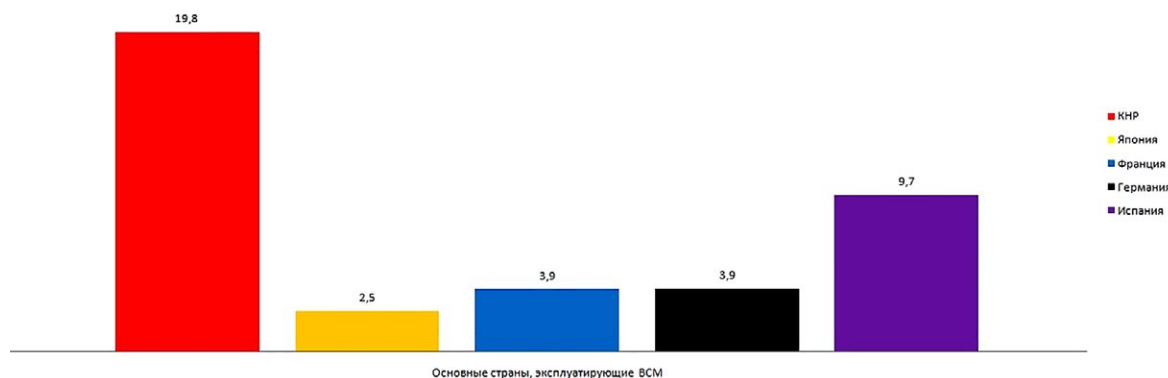


Рис. 3. Гистограмма среднего значения темпов роста ВСМ в странах, имеющих наибольшую протяженность ВСМ

Fig. 3. Average value of growth of the length of HSR in countries, most actively developing the HSR network

Анализируя Рис. 2 и Рис. 3, становится понятно, что в странах, которые начали строить ВСМ раньше других, скорость строительства в последние годы сильно снизилась, а в ряде стран упала до нуля (например, в Германии). Абсолютным лидером среди стран-лидеров по развитию ВСМ, по темпам прироста протяженности несомненно является Китай,

причем к 2014 г. прирост остается примерно постоянным и составляет от 3000 до 4500 км/год, или 19,8% ежегодно в среднем.

Замедление можно отследить по диаграмме на Рис. 4, построенной по данным, приведенным в [1].

Из них видно, что расширение сети ВСМ во многих странах даже не планируется, например, в Германии строится всего 74 км, и запланировано еще 84, и то на долгосрочную перспективу без указания срока (участок Франкфурт – Мангейм), и нет никаких гарантий, что этот участок будет построен. Ряд стран так и не приступил к строительству ВСМ. К таким странам относятся США [6–8]. До сих пор в США имеется всего одна линия на востоке страны, остальная сеть развивается крайне медленно, окончательно не решен вопрос с финансированием.

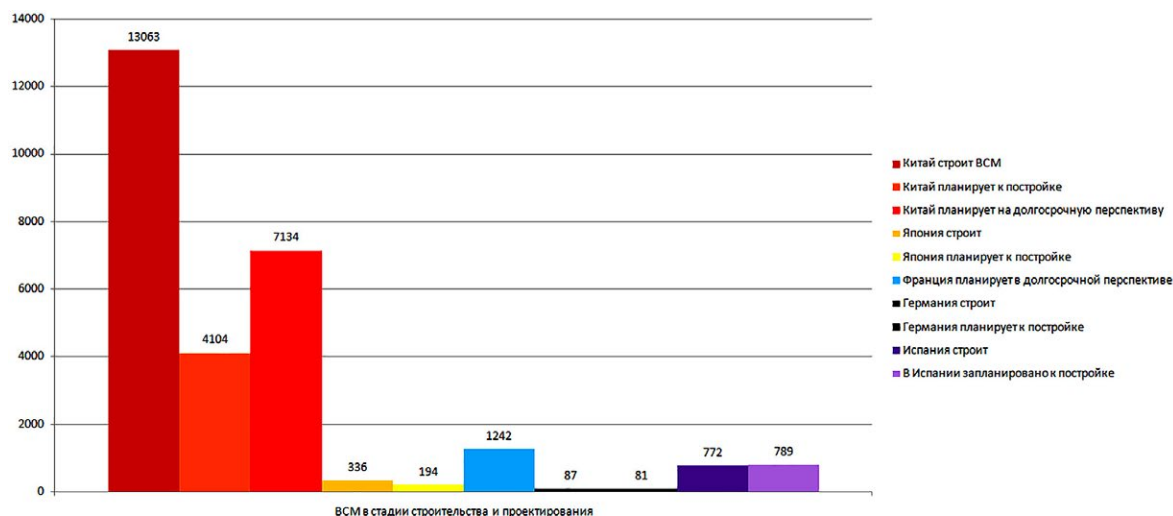


Рис. 4. Гистограмма планируемых к постройке линий ВСМ

Fig. 4. Histogram of planned high-speed railway lines

РАЗВИТИЕ ВСМ В ЯПОНИИ

Япония приступила к строительству линий «Синкансен» в 1959 г. и ввела в эксплуатацию тестовый участок Токио – Осака в 1964 г. [9, 10].

С этого момента протяженность линий ВСМ в Японии росла каждые несколько лет, вводились новые участки, пока не сформировалась сеть протяженностью 3146 км к 2023 г. Однако, после 2010 г. увеличение протяженности сети замедлилось (развитие переключилось на другие направления – обновление парка подвижного состава, повышение скорости, создание сети скоростного движения «Мини Синкансен» [9]). Причем

замедление роста протяженности произошло несмотря на то, что еще с 1970 гг. было запланировано почти в 3 раза большая протяженность линий, чем построено сейчас. Динамика увеличения протяженности ВСМ в Японии приведена в виде графика на Рис. 5. График построен по данным статистики, опубликованным Международным союзом железных дорог (МСЖД) [1].

В то время как участки ВСМ вводились в строй дискретно (ступенчато), на Рис. 1 зависимость протяженности представлена в виде плавной кривой $l=f(t)$ с целью упрощения аппроксимации, для получения математического описания зависимости (протяженности ВСМ) от t (года от начала постройки), что позволит выполнить прогноз. Сплошной линией на Рис. 5 изображена протяженность действующих (эксплуатируемых) линий, частыми штрихами – протяженность линий на этапе строительства, редкими штрихами – запланированные к постройке на долгосрочную перспективу [1, 11, 12].

Для того, чтобы сделать прогноз или выполнить сравнение роста протяженности ВСМ в различных странах, необходимо найти аналитическое описание (функцию) в виде зависимости l от t .

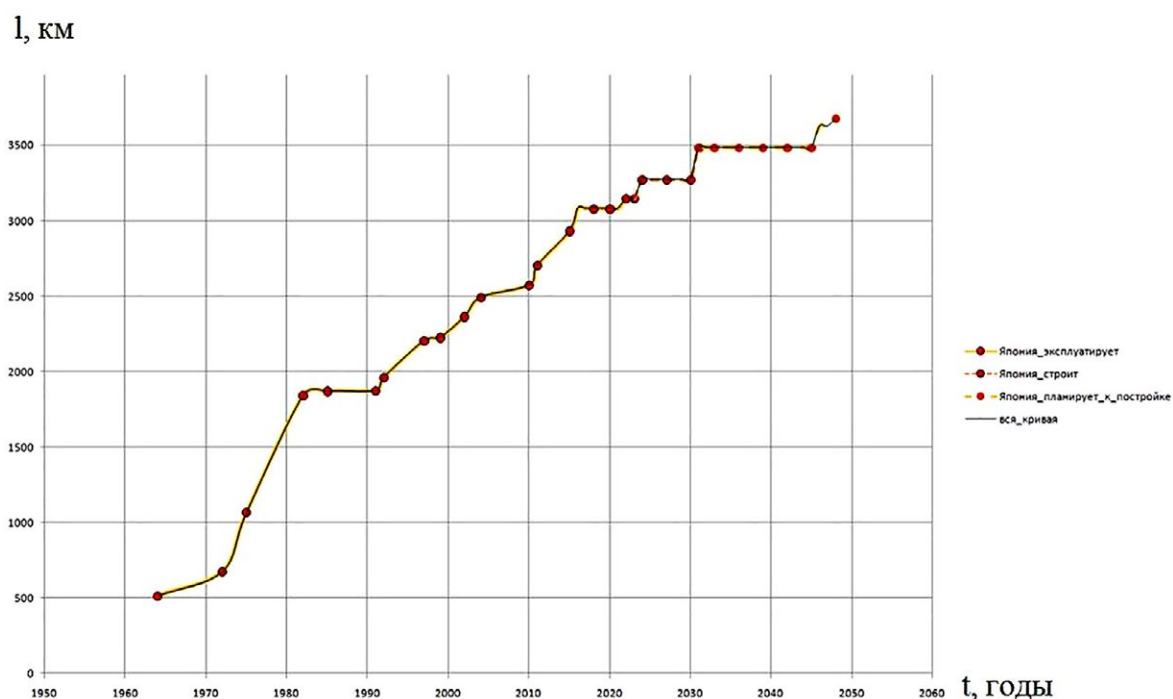


Рис. 5. Протяженность ВСМ в Японии

Fig. 5. Length of HSR lines in Japan

Известно много различных методов для оценки статистических данных, которые называются методами регрессионного анализа, например, метод наименьших квадратов (МНК) и проч. с последующей корреляцией. В настоящее время корреляция может выполняться на ЭВМ (компьютерах). Так, программа Microsoft Excel дает возможность определять параметры аппроксимирующей функции и сразу строить линию тренда, можно использовать как линейную, так и полиномиальную зависимости, степенную или логарифмическую функцию. Эту же зависимость можно получить с использованием САПР Math Cad компании Math Soft.

После построения линии тренда необходимо определить квадрат коэффициента корреляции чтобы оценить достоверность аппроксимации функцией.

Из Рис. 5 видно, что темпы роста протяженности ВСМ снижаются. К примеру, в 60-х – 70-х гг. XX века они составляли от 100 до 200 км ежегодно, или около 2,5 %, а к началу 20-х гг. XXI века составляют всего в среднем 10-15 км ежегодно и продолжают снижаться. Можно высказать гипотезу, что функция протяженности линий ВСМ от времени имеет некоторый предел при определенном значении t , определяемый спросом на услуги только ВСМ и не связанный с протяженностью традиционных железных дорог. Для того, чтобы найти данный предел и постоянную времени роста протяженности нужно представить зависимость Рис. 5 в виде аналитического выражения, затем продифференцировать его и определить аргумент, при котором производная станет равной нулю.

АППРОКСИМАЦИЯ КРИВОЙ РОСТА ПРОТЯЖЕННОСТИ ВСМ В ЯПОНИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ФУНКЦИЕЙ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для поиска непрерывной функции, позволяющей наиболее точно рассчитать изменение какой-либо величины по статистическим данным, можно использовать различные математические методы.

Одним из способов аппроксимации, т.е. функции, имеющей максимального приближения к исходным данным, является использование полиномов [12]. Одним из таких полиномов (многочленов) является полином Лагранжа, однако не смотря на его преимущества, он лучше подходит для интерполяции. В нашем конкретном случае необходима экстраполяция, с выходом за границы области определения. Поэтому, если предполагать в соответствии с высказанной выше гипотезой, что протяженность линий стремится к максимальному значению

(экстремуму), лучше использовать полином второй степени. В программе Microsoft Excel имеется несколько способов аппроксимации: построение линии тренда на графике с использованием различных функций и использование регрессии по методу наименьших квадратов. Такой же метод можно использовать и с использованием пакета прикладных программ Math Cad.

На Рис. 6, 7 представлена аппроксимация зависимости роста протяженности ВСМ в Японии полиномом второй степени и экспонентой соответственно.

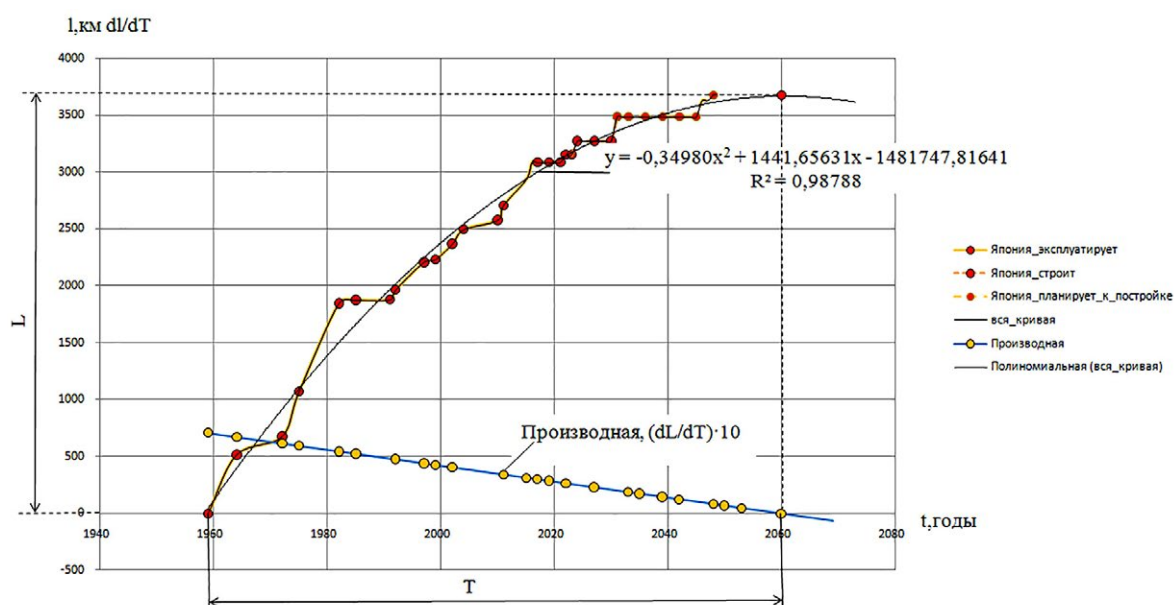


Рис. 6. Аппроксимация зависимости роста протяженности ВСМ в Японии от времени полиномом второй степени

Fig. 6. Approximation of the dependence of the growth of the length of the high-speed railway in Japan on time by a square polynomial function

Наибольшее значение коэффициента квадрата коэффициента корреляции R^2 достигается при использовании полинома второй степени. Кроме того, полиномиальная функция имеет явно выраженный максимум (экстремум) и легко дифференцируется понижением степени, что позволяет легко определить координаты этого экстремума (Рис. 6). Такой метод хорош для интерполяции значений. Однако, после достижения экстремума полиномиальная функция начинает убывать, что совершенно нехарактерно для общих тенденций развития ВСМ.

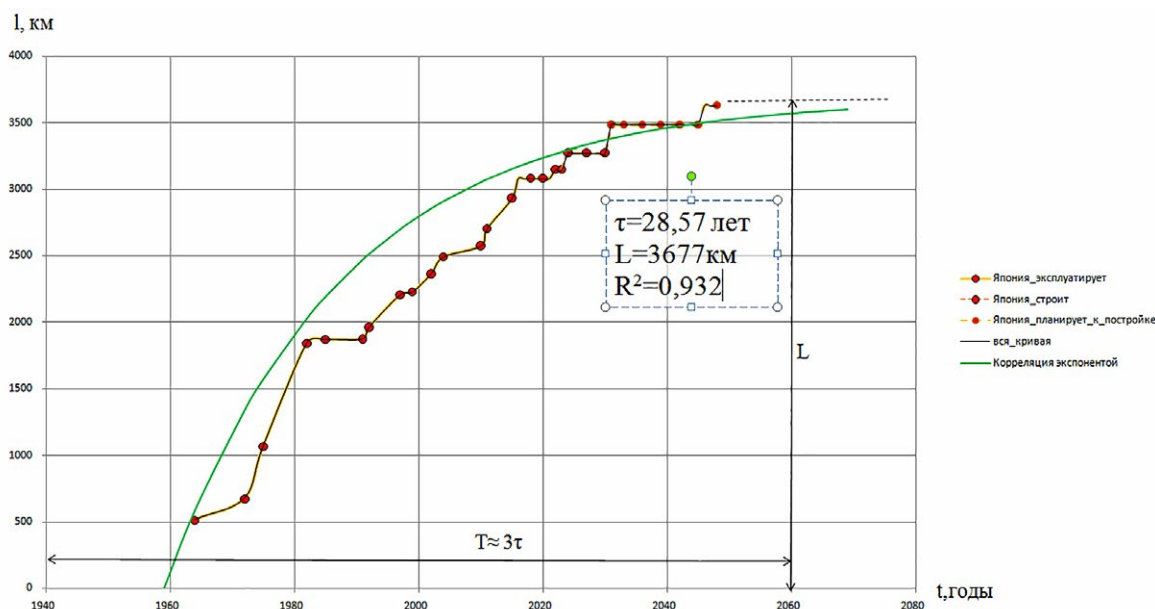


Рис. 7. Аппроксимация роста протяженности (эксплуатационной длины) ВСМ в Японии экспоненциальной зависимостью

Fig. 7. Approximation of the growth of the length of the high-speed railway in Japan by exponent

Так как целью настоящей работы является прогноз развития ВСМ, для чего предполагается выполнение экстраполяции, лучшим решением является использование экспоненциальной зависимости, а исследование полинома использовать как промежуточный этап для определения коэффициентов при экспоненте.

Тогда рост протяженности ВСМ можно определить по формуле:

$$l = L \cdot (1 - e^{-\frac{t-T_0}{\tau_J}}) \quad (1)$$

где l – протяженность ВСМ на год t ; L – предельное значение протяженности ВСМ при $t \rightarrow \infty$ (эксплуатационная длина сети ВСМ); T_0 – год начала строительства ВСМ в стране; τ_J – постоянная времени строительства ВСМ в отдельно взятой стране, к примеру, в Японии в годах; t – текущий год.

Для определения величины τ можно использовать результаты аппроксимации полиномом:

$$l = -0,3498t^2 + 1441,656t - 1481747 \quad (2)$$

и производной этой функции:

$$dl / dt = -0,6996t + 1441,656 \quad (3)$$

где t – текущий год.

Решив уравнение (3) для $dl/dt=0$, можно принять абсциссу этой точки за год окончания формирования сети (Рис. 6), полагая при этом:

$$T = t_e - T_0 \quad (4)$$

где T – время формирования сети ВСМ; t_e – год формирования сети; T_0 – год начала строительства сети ВСМ.

Известно, что функция, описываемая выражением (1) достигает установившегося значения за $3 \div 5 \tau$.

Поэтому, приняв за

$$\tau = T / 3 \quad (5)$$

можно записать выражение (1), выполнив подстановку L и τ (L определяется как ордината функции $l(t)$ по Рис. 6 для точки $dl/dt=0$). После этого можно скорректировать параметры функции, описанной формулой (1) таким образом, чтобы значение квадрата коэффициента корреляции R^2 было максимальным [13].

Тогда выражение, описывающее формирование сети ВСМ в Японии выглядит как:

$$l = 3667 \cdot (1 - e^{-\frac{t-T_0}{28,5}}) \quad (6)$$

Аналогично можно проанализировать и формирование сети ВСМ в других странах, однако это не входит в рамки данной статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа статистических данных, относящихся к росту национальных систем ВСМ были получены следующие выводы:

1. Среди стран, строящих ВСМ, первое место по протяженности линий занимает Китай, он же лидирует и по динамике роста сети.
2. В странах, строящих ВСМ на протяжении значительного времени (Япония, Франция, Германия), наблюдается снижение

- динамики, что говорит о формировании сети ВСМ с неизменной протяженностью.
3. Данные по развитию ВСМ поддаются аппроксимацией непрерывной экспоненциальной функцией, с высоким коэффициентом корреляции ($R^2=0,932$).
 4. Формирование сети ВСМ в разных странах составляет около 60 лет, на примере Японии;
 5. Чем позже страна начала строить сеть ВСМ, тем быстрее она ее строит;
 6. В Японии сеть ВСМ полностью сформируется к 2040–2050 гг.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. High Speed Lines in the World. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: https://uic.org/IMG/pdf/20231001_high_speed_lines_in_the_world.pdf
2. Китай остается мировым лидером по темпам строительства ВСМ // Железные дороги мира. 2024. №3. С. 27-32. EDN: XTPRDS
3. Гринемайер А.А., Аникин И.Б., Парфененко Р.Е., Изварин М.Ю. Перспективы развития сети высокоскоростных железных дорог в мире на ближайшее десятилетие // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, Вып. 2. С. 259-265. doi: 10.20295/1815-588X-2022-2-259-265
4. Изварин М.Ю., Евстафьев А.М., Евстафьева М.В. Оценка энергоэффективности скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. № 5-6. С. 21-23. doi: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-259-265
5. Britain is building one of the world's most expensive railways. Many people now think it's pointless. Агентство CNN от 18.10.2024 Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://edition.cnn.com/travel/hs2-britain-expensive-high-speed-railway/index.html>
6. California Governor's Budget Provides Steady Funding for High-Speed Rail. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://www.hsrail.org/blog/newsletter-5-16-25-steady-funding-for-california-high-speed-rail/>
7. A high-speed rail bill just dropped in Congress. Here's why it's a big deal Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://www.hsrail.org/blog/205b-american-high-speed-rail-act-introduced/>
8. Vision for high-speed rail in America. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://railroads.dot.gov/elibrary/vision-high-speed-rail-america>

9. Yoshitaka Muro, Norikazu Tanaka, Tetsuo Santo, et al. Special Roundtable to Commemorate the 60th Anniversary of the Shinkansen's Inauguration // Toward Railway Innovation Ascent. Railway Technical Research Institute. 2025. № 16. P. 3-16. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: https://www.rtri.or.jp/eng/publish/ascent/u0ps1q0000000m3u-att/ascent16-all_0328.pdf
10. Japan's Shinkansen turns 60/The world's first high-speed line has had lasting impact on the evolution of passenger rail worldwide // International Railway Journal. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://www.railjournal.com/passenger/high-speed/japans-shinkansen-turns-60/>
11. Shinkansen (Bullettrain) routemap. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: http://www.trainfrontview.net/sinkansen_map.htm
12. Аппроксимация функций: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Информатика». Волгоград: Волг ГАСУ, 2012. Дата обращения: 01.05.2025. Режим доступа: <https://vgasu.ru/attachments/aproximacia.pdf>
13. Пальма И.С., Эльгорт Л.Г. Применение метода корреляции в строительстве. М.: Статистика, 1971.

REFERENCES

1. High Speed Lines in the World. Accessed: 01.05.2025. Available from: https://uic.org/IMG/pdf/20231001_high_speed_lines_in_the_world.pdf
2. China remains the world leader in the pace of high-speed rail construction. *World Railways*. 2024. №3. С. 27-32. (In Russ.) EDN: XTPRDS
3. Greenemeier AA, Anikin IB, Parfenenko RE, Izvarin MYu. Prospects for the development of the high-speed railway network in the world for the next decade. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2022;19(2):259-265. (In Russ.) doi: 10.20295/1815-588X-2022-2-259-265
4. Izvarin MYu, Evstafiev AM, Evstafieva MV. Assessment of energy efficiency of high-speed and high-speed rail transport. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2015;5-6:21-23. (In Russ.) doi: 10.20295/1815-588X-2022-19-2-259-265
5. Britain is building one of the world's most expensive railways. Many people now think it's pointless. CNN 18.10.2024 Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://edition.cnn.com/travel/hs2-britain-expensive-high-speed-railway/index.html>
6. California Governor's Budget Provides Steady Funding for High-Speed Rail. Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://www.hsrail.org/blog/newsletter-5-16-25-steady-funding-for-california-high-speed-rail/>
7. A high-speed rail bill just dropped in Congress. Here's why it's a big deal Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://www.hsrail.org/blog/205b-american-high-speed-rail-act-introduced/>
8. Vision for high-speed rail in America. Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://railroads.dot.gov/elibrary/vision-high-speed-rail-america>
9. Yoshitaka Muro, Norikazu Tanaka, Tetsuo Santo, et al. Special Roundtable to Commemorate the 60th Anniversary of the Shinkansen's Inauguration // Toward Railway Innovation Ascent. Railway Technical Research Institute. 2025. № 16.

- P. 3-16. Accessed: 01.05.2025. Available from: https://www.rtri.or.jp/eng/publish/ascent/u0ps1q0000000m3u-att/ascent16-all_0328.pdf
10. Japan's Shinkansen turns 60/The world's first high-speed line has had lasting impact on the evolution of passenger rail worldwide // International Railway Journal. Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://www.railjournal.com/passenger/high-speed/japans-shinkansen-turns-60/>
 11. Shinkansen (Bullettrain) routemap. Accessed: 01.05.2025. Available from: http://www.trainfrontview.net/sinkansen_map.htm
 12. *Approximation of functions: guidelines for laboratory work on the discipline "Computer Science"*. Volgograd: Volg GASU; 2012. (In Russ.) Accessed: 01.05.2025. Available from: <https://vgasu.ru/attachments/aproximacia.pdf>
 13. Palma IS, Elgort LG. Application of the correlation method in construction. Moscow: Statistika, 1971. (In Russ.)

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

Mikhail Y. Izvarin, Cand. Sci. (Engineering), Docent;
e-Library SPIN: 7753-5243; ORCID: 0009-0002-5638-3867;
E-mail: misha3568723@yandex.ru

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst683381>

© А.Э. Юницкий, М.И. Цырлин, Р.А. Малахов, А.Н. Петровец
ЗАО «Струнные технологии»
(Минск, Республика Беларусь)

ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ uST В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Обоснование. В работе предложено решение транспортных проблем в условиях вечной мерзлоты применением транспортно-инфраструктурных решений Unitsky String Technologies. При устройстве фундаментов сооружений рекомендуется использовать винтовые сваи.

Цель. Обеспечение безопасной и эффективной перевозки грузов и пассажиров в районах с вечной мерзлотой рельсо-струнным транспортом.

Методы. Расчет винтовых свай под стойки опор рельсо-струнной путевой структуры транспортно-инфраструктурных комплексов производился с помощью программного комплекса Dlubal Rfem.

Результаты. Анализ результатов расчета показал достаточную надежность предложенной конструкции фундаментов опор.

Ключевые слова: Арктика; вечная мерзлота; струнный транспорт; транспортный комплекс uST; винтовые сваи.

Как цитировать:

Юницкий А.Э., Цырлин М.И., Малахов Р.А., Петровец А.Н. Применение транспортных комплексов uST в условиях вечной мерзлоты // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 202–218. doi: 10.17816/transsyst683381

Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© **A.E. Unitsky, M.I. Tsyrlin, R.A. Malakhov, A.N. Petrovets**

Unitsky String Technologies, Inc.

(Minsk, Republic of Belarus)

USE OF uST TRANSPORT SYSTEMS IN PERMAFROST CONDITIONS

BACKGROUND. The paper proposes to solve transportation problems in permafrost conditions using Unitsky String Technologies transport and infrastructure solutions. It is advised to use screw piles to build foundations for structures.

AIM. To ensure safe and efficient transportation of goods and passengers in permafrost areas using string rail systems.

METHODS. Screw piles for support legs of a string rail track structure of transport and infrastructure systems were calculated using Dlubal Rfem software.

RESULTS. The calculation showed high reliability of the proposed design of support foundations.

Keywords: Arctic, permafrost; string transport; uST transport system; screw piles.

To cite this paper:

Unitsky AE, Tsyrlin MI, Malakhov RA, Petrovets AN. Use of uST Transport Systems in Permafrost Conditions. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):202–218. doi: 10.17816/transsyst683381

ВВЕДЕНИЕ

Около 11% поверхности Земли покрыто вечной мерзлотой, охватывающей общую площадь около 18 миллионов км² [1]. Сюда входят большие площади США, Канады, Гренландии и России. Вечная мерзлота – это толщи земных пород, не оттаивающие в течение длинного периода времени – от нескольких лет до тысячелетий. Глубина зоны многолетней мерзлоты иногда превышает 1000 метров, грунтовые воды в этой зоне находятся в виде льда. Вечномерзлый грунт – это грунт, находящийся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет. В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна примерно 10,7 млн км², что составляет около 65% территории страны.

Значительными проблемами указанных территорий являются рельеф местности и климат. Так, автомобильные дороги часто пересекают реки, болота, озера, близ которых характерны обводненные грунты. Кроме того, зимой устойчивый снежный покров в отдельных районах вечной мерзлоты достигает 3–4 метров, для летнего периода характерны обильные осадки в виде дождей. Вода, содержащаяся в верхних слоях земли над мерзлым грунтом, замерзая, увеличивается в объеме до 10%, что приводит к вспучиванию земли. Вместе с поднятием грунта приподнимается все, что находится на поверхности земли или в ее верхних слоях. Влияние этих факторов определяет сезонный характер использования отдельных видов транспорта, удорожает строительство и эксплуатацию транспортной инфраструктуры, значительно увеличивает временные затраты и транспортные издержки в целом, усложняя задачи обеспечения территорий жизненно важной продукцией и снижая конкурентоспособность местных производителей товаров и услуг [2]. Как результат, транспортные издержки в ценах на товары в Арктической зоне России составляют до 60% вместо 10%, характерных для средних широт страны.

Еще одним важнейшим фактором, влияющим на работу Арктического транспортного комплекса, является изменение климата. Данные в оценочных докладах Росгидромета показали, что в Арктике в течение трех последних десятилетий температура повышалась значительно, чем в остальных регионах земного шара. При этом предполагается дальнейшая деградация многолетней мерзлоты, сопровождающаяся увеличением мощности сезонно-талого слоя [3].

Также необходимо отметить, что в отдельных районах, таких как Республика Саха (Якутия), Магаданская область, Чукотский автономный округ в целом отсутствует опорная сеть автомагистралей.

Таким образом, совокупность указанных проблемных моментов требует разработки и внедрения в экономику Арктического региона новых решений в транспортной и связанной с ней отраслях, что будет более подробно рассмотрено в настоящей статье.

ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ УСТРОЙСТВА ДОРОГ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Основным способом устройства дорог являются насыпи с уложенным поверх бетонными плитами [4]. Как правило, конструкцию земляного полотна устраивают по принципу недопущения оттаивания вечной мерзлоты в основании, но это получается не всегда. Тепло, создаваемое солнцем и движущимся транспортом, нагревает почву, в результате чего система теряет монолитность и смещается в процессе подтаивания, то есть проседает. Кроме того, данные явления могут встречаться по причине глобального потепления. Например, дорожное полотно на трассе Уренгой – Тазовский (Ямало-Ненецкий автономный округ) пошло волнами уже на третий год после завершения строительства (Рис. 1).

Также в северных регионах распространен такой тип дорог, как «зимники» – временные автомобильные дороги, эксплуатация которых возможна только в зимних условиях, при минусовой



Рис. 1. Дорога Уренгой – Тазовский (ЯНАО)

Fig. 1. Road Urengoy – Tazovsky (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug)

температуре (Рис. 2). Для устройства зимника снег уплотняют и разгребают грейдерами, на реках намораживают ледовые переправы. Зимник может также проходить непосредственно по замерзшему льду рек и озер. Зимники широко распространены в Сибири и районах Крайнего Севера, в болотистых регионах, и там, где отсутствуют мосты через многочисленные ручьи и реки, и в других труднодоступных условиях. Часто зимники используются для доставки грузов и оборудования на нефте- и газопромыслы, а особенно часто – для вывоза тяжелого и труднодоступного леса.



Рис. 2. Автозимник Певек – Купол на Чукотке

Fig. 2. Winter road Pevek – Dome in Chukotka

ТРАНСПОРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ uST В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

С учетом обозначенной проблематики одним из действенных решений, апробированных в Беларуси и ОАЭ, является применение транспортно-инфраструктурных решений Unitsky String Technologies (uST), основанных на технологии создания предварительно напряженных транспортных эстакад нового поколения, позволяющих осуществлять перевозку пассажиров и грузов в автоматизированном режиме по рельсо-струнной путевой структуре, размещенной на «втором уровне» (Рис. 3) [5].



Рис. 3. Струнный транспорт в зимнем ЭкоТехноПарке
(на переднем плане – 14-местный юнибус, на втором плане 6-местный юникар).
Марьина Горка, Беларусь, 2020 г.

Fig. 3. String transport in winter EcoTechnoPark
(in the foreground is a 14-seater unibus, in the background is a 6-seater unicar).
Maryina Gorka, Belarus, 2020

Указанная рельсо-струнная эстакада включает в себя анкерные опоры, промежуточные опоры, предварительно напряженную путевую структуру.

Эстакадное исполнение комплексов uST может позволить решать проблемы, связанные с заметанием дорог снегом и подвижностью почв, что особенно актуально для северных территорий России [6]. Например, поднятые над землей на высоту 10 метров и более струнные рельсы в постоянном режиме самоочищаются от снега и наледи стальными колесами движущегося транспорта. При этом обеспечивается высокий уровень безопасности за счет подъема подвижного состава на второй уровень, позволяя избежать столкновения с объектами, движущимися по поверхности земли.

Длина пролетов в рельсо-струнной эстакаде может достигать 2 км, что позволяет преодолевать без опор, по воздуху, широкие препятствия, связанные с геологическими и рельефными особенностями региона. При этом конструкция эстакады позволяет прокладывать маршрут по прямой (наиболее короткой траектории), в том числе над водной преградой

или другим труднопроходимым участком местности, без использования дополнительных сооружений, что сокращает расстояние до пункта назначения, а также затраты (временные, эксплуатационные и др.).

Наиболее многочисленными несущими элементами путевой структуры, непосредственно влияющими на безопасность всего комплекса, являются промежуточные опоры, которые, как правило, располагаются с шагом 50–250 м. В большинстве своем они представляют собой П- и Т-образные металлические и железобетонные конструкции, неотъемлемой частью которых являются фундаменты. В условиях арктического климата наиболее целесообразными будут являться свайные фундаменты [7]. При проектировании такого фундамента в зонах вечной мерзлоты следует учитывать влияние на устойчивость и эксплуатационную надежность сооружения таких факторов, как недостаточная несущая способность свай, воздействие сил морозного пучения, потеря устойчивости при внезапном оттаивании грунтов, мерзлотно-геоморфологические явления, вызывающие деформации сооружений. Например, сваи для талых грунтов могут быть изготовлены и погружены с довольно значительным диаметром винтовой части (800 мм). Наиболее распространенная конструкция – одновитковый анкер (Рис. 4а) [8].

Стоит отметить, что при устройстве фундаментов сооружений на вечномерзлых грунтах рекомендуется использовать узколопастные сваи, у которых диаметр лопасти не превышает диаметр ствола более чем в 1,5 раза, имеют больший угол наклона спирали, большее количество «витков» анкерной части, но существенно меньший диаметр анкера (Рис. 4б, 5) [8]. При этом существенно упрощается установка лопасти на ствол сваи. В этой связи лопасть винтовой сваи предлагается изготавливать из металлического троса, протянутого через радиальные отверстия, расположенные по винтовой линии, концы которого фиксируются после зажима хомутами, расположенными в полости сваи (Рис. 5а).

Анкерные элементы на теле сваи могут быть выполнены из листового проката (Рис. 5б), а также из иных прокатных профилей: уголков, арматуры (Рис. 5с) [8]. Это позволяет равномерно и максимально эффективно распределять грунты во время ввинчивания свай, одновременно уплотняя слои почв и обеспечивая высокую несущую способность. При этом диаметр троса, число оборотов вокруг ствола и расстояние между отверстиями определяются расчетным путем; завинчивание свай производится ниже уровня возможного оттаивания вечномерзлой почвы.

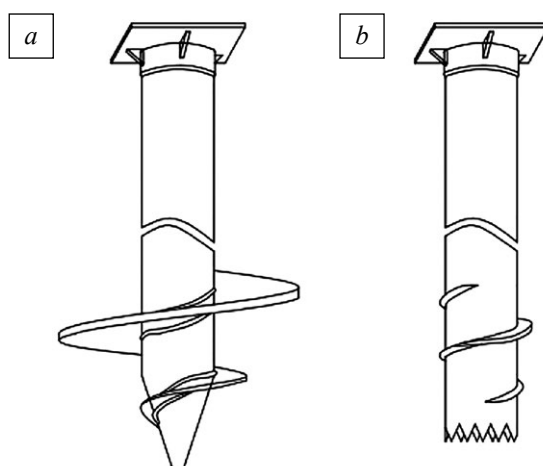


Рис. 4. Винтовые сваи: *a* – для талых грунтов; *b* – для вечномёрзлых грунтов

Fig. 4. Screw piles: *a* – for thawed soils; *b* – for permafrost soils

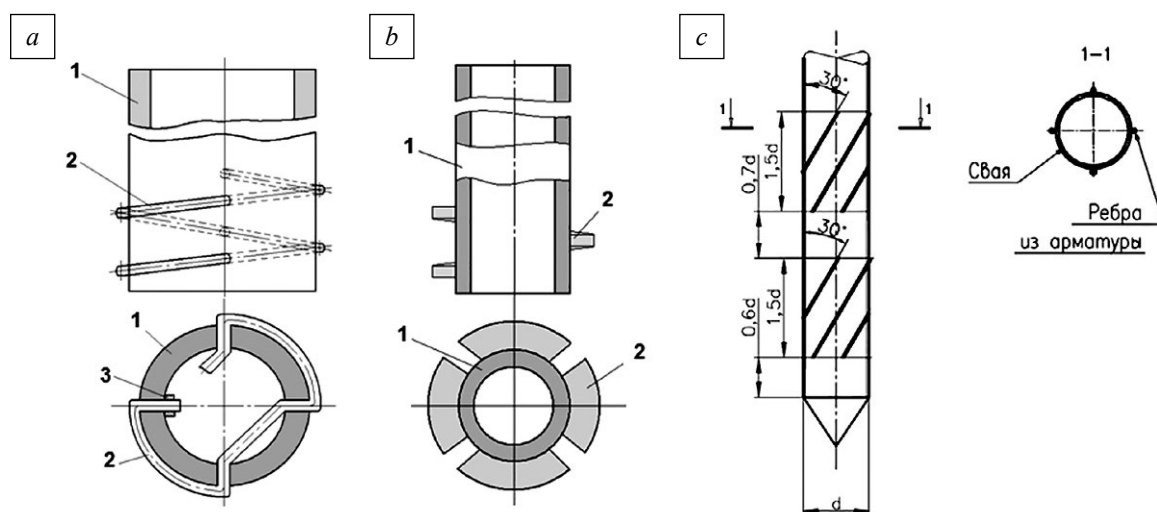


Рис. 5. Варианты устройства лопастей свай

a – лопасть из троса, каната: 1 – ствол, 2 – трос, 3 – зажим;

b – лопасть из листовой стали: 1 – ствол, 2 – кольцевые элементы;

c – лопасти из приваренной арматурной стали

Fig. 5. Options for constructing pile blades

a – blade made of cable, rope: 1 – barrel, 2 – cable, 3 – clamp;

b – blade made of sheet steel: 1 – barrel, 2 – ring elements;

c – blades made of welded reinforcing steel

Применение винтовых свай в рамках строительства транспортно-инфраструктурных решений uST позволяет существенно увеличить скорость производства работ, обеспечивая быстрый и надежный фундамент, повышает общую эффективность проекта.

Относительно других видов транспорта струнный транспорт [9, 10] имеет ряд преимуществ: не зависит от непогоды, сезона, времени суток, практически не занимает территорию, отвечает экологическим и эргономическим требованиям, обеспечивает высокую (до 150 км/ч и более) скорость передвижения, ровность и плавность хода, требуемый уровень комфорта, не нарушает естественный биоценоз, установившуюся схему миграции диких животных, не нарушает жизненный уклад местного населения, подходит для электрической тяги, беспилотного режима.

РАСЧЕТ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАИ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

В работе выполнен расчет сваи под стойки промежуточной опоры (Рис. 6). Путевая структура принята полужесткая с массой транспортного средства 42 000 кг. Расчет несущей способности сваи производился согласно СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» пункта 7.2 «Расчет оснований и фундаментов при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I» [11] в программном NormCAD.

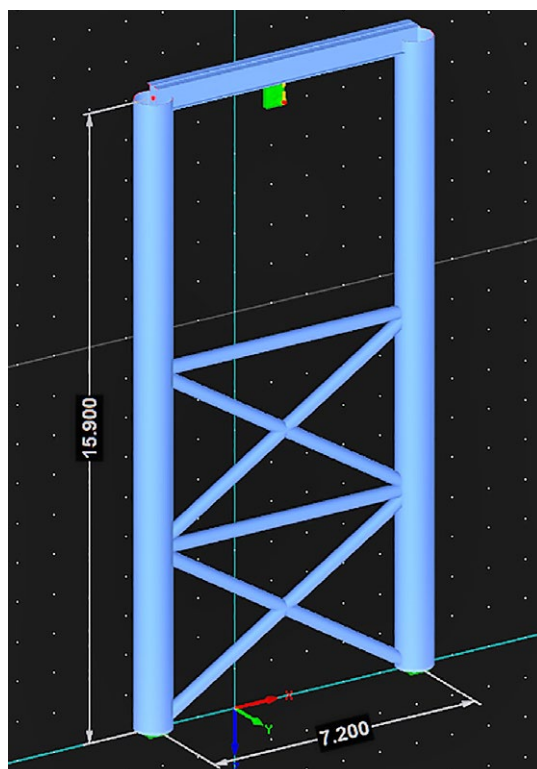


Рис. 6. Общий вид промежуточной опоры в рамках проводимого расчета

Fig. 6. General view of the intermediate support under analysis

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СВАИ

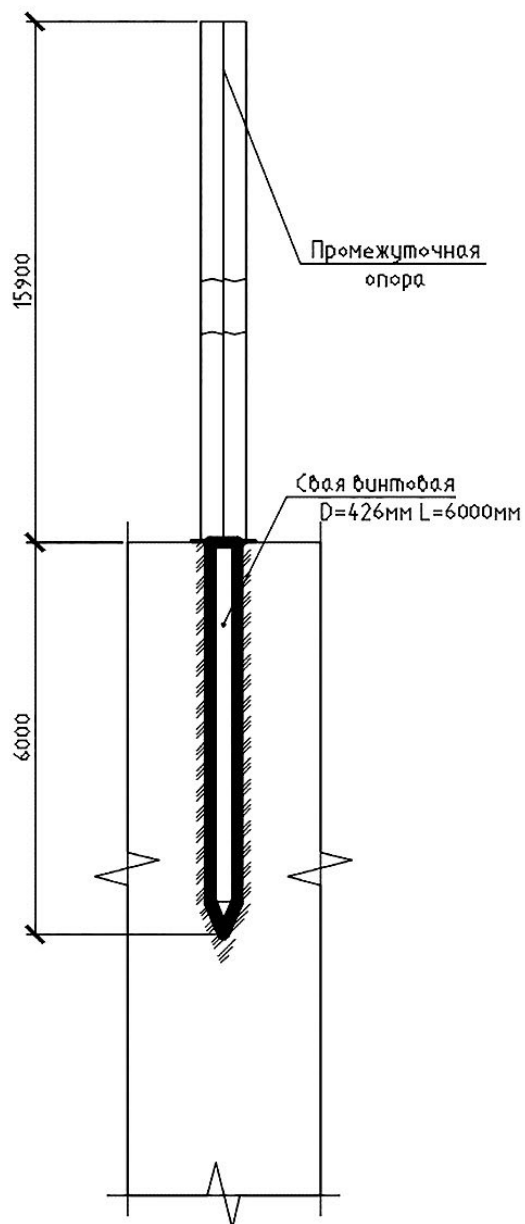
В Табл. приведены исходные данные для расчета. Климатические данные принимались программным комплексом в зависимости от выбора района строительства по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [12] для холодного и теплого периода.

Таблица. Исходные данные

Table. Initial data

Наименование	Значение данных
1. Район строительства: Камчатская область, Усть-Камчатск	– продолжительность периода отрицательных температур в году по многолетним данным $t_{f,m} = 4344ч$; – продолжительность периода положительных температур в году по многолетним данным $t_{th,m} = 4416ч$; – средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур $T_{f,m} = -8,26^{\circ}C$; – средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур $T_{th,m} = 7,23^{\circ}C$; – среднегодовая температура наружного воздуха $T_{out} = -0,5^{\circ}C$; – амплитуда сезонных колебаний температуры наружного воздуха $A = 11,8^{\circ}C$; – среднеквадратическое отклонение средней годовой температуры наружного воздуха $\sigma = 0,74^{\circ}C$.
2. Геологические данные: грунт – суглинок	– толщина слоя $h_1 = 10$ м; – удельный вес $g_1 = 17,7$ кН/м³; – удельный вес частиц грунта $g_{s1} = 27,6$ кН/м³; – коэффициент пористости $e_1 = 0,2$; – показатель текучести $I_{L1} = 0,1$; – плотность талого грунта в сухом состоянии $r_{d, th1} = 1800$ кг/м³; – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии $r_{df1} = 1600$ кг/м³; – расчетная глубина сезонного оттаивания $d_{th} = 1,05$ м; – льдистость мерзлого грунта за счет включений льда слоя $I_{iil} = 0,15$; – суммарная влажность мерзлого грунта $W_{tot1} = 0,2$; – влажность грунта на границе текучести $W_{L1} = 0,35$; – влажность грунта на границе пластичности $W_{pl} = 0,25$.
3. Данные эксплуатации: назначение – фундамент промежуточной опоры	– длительность эксплуатации сооружения $t = 150$ лет; – коэффициент надежности по ответственности сооружения по ГОСТ 27751-88 $\gamma_n = 1,2$ (повышенный) [13].
4. Параметры свай	– стальная полая винтовая свая; – диаметр свай $D = 426$ мм; – длина свай $L = 6000$ мм; – заложение от уровня планировки $L_1 = 6000$ мм; – вертикальная нагрузка на сваю $N = 761,9$ кН.

Конструктивная схема



Расчётная схема

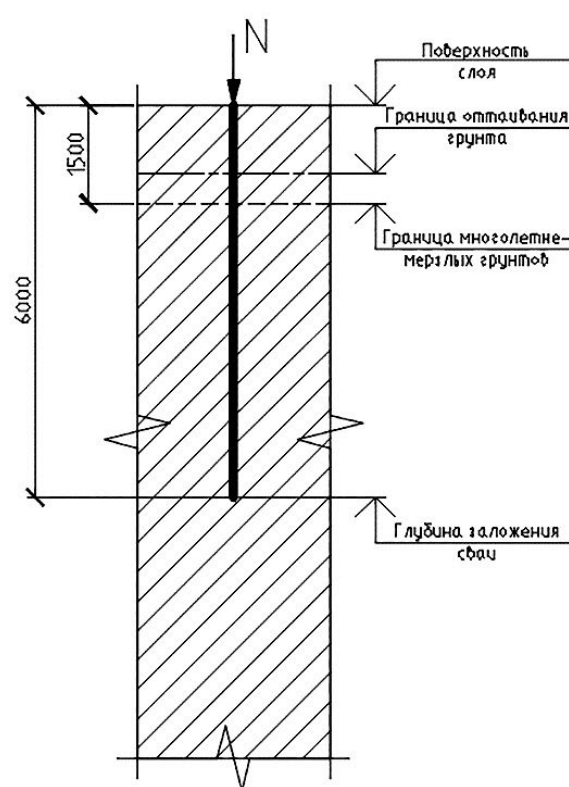


Рис. 7. Конструктивная и расчетная схема сваи

Fig. 7. Structural and design diagram of the pile

На Рис. 7 представлена конструктивная и расчетная схема сваи.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СВАИ ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В состав физических и теплофизических характеристик, определяемых для многолетнемерзлых грунтов, входят:

- а) суммарная влажность мерзлого грунта – W_{tot} и влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями – W_m – определяются по ГОСТ 5180–2015 лабораторными испытаниями;
- б) суммарная льдистость мерзлого грунта – i_{tot} , представляющая собой отношение содержащегося в мерзлом грунте объема льда к объему мерзлого грунта и льдистость грунта за счет видимых ледяных включений – i_i , представляющая собой отношение содержащегося в мерзлом грунте объема видимых ледяных включений к объему мерзлого грунта – определяются по ГОСТ 25100–2020;
- в) степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой – S_r , доли единицы;
- г) температура начала замерзания грунта – T_{bf1} ;
- д) влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды – W_m , доли единицы;
- е) теплофизические характеристики грунта (теплопроводность – λ , Вт/(м·°С) и объемная теплоемкость – C , Дж/(кг·°С));
- ж) теплота таяния льда (замерзания воды) в грунте – L_v ;
- з) степень засоленности – D_{sai} , %;
- и) концентрация порового раствора – C_{ps} , доли единицы;
- к) объемная степень заторфованности – J , доли единицы;
- л) степень заторфованности – G , доли единицы.

Расчет оснований по первой группе предельных состояний в программе Normcad по СП 25.13330.2012

Перед определением прочностных характеристик грунта необходимо определить температурные показатели и коэффициенты.

Расчетное значение температуры на глубине заложения фундамента, отсчитываемой от верхней грани поверхности многолетнемерзлого грунта [11]:

$$T_{z,0} = T_z = (T_0 - T_{bf}) \cdot \alpha_z + T_{bf} = (-5 + 0,2) \cdot 0,93 - 0,2 = -4,67^\circ\text{C} \quad (1)$$

где T_0 – расчетная среднегодовая температура грунта основания; $T_0 = -5^\circ\text{C}$; T_{bf} – температура начала замерзания грунта; $T_{bf} = -0,2^\circ\text{C}$; α_z – коэффициент; $\alpha_z = 0,93$.

Расчетное значение температуры многолетнемерзлого грунта:

$$T_e = (T_0 - T_{bf}) \cdot \alpha_z = T_{bf} = (-5 + 0,2) \cdot 0,593 - 0,2 = -3,05^\circ\text{C} \quad (2)$$

где α_z – коэффициент; $\alpha_z = 0,593$.

Условие прочности грунта при действии сжимающей нагрузки:

$$F \leq \frac{F_u}{\gamma_n} \quad (3)$$

где F – расчетная нагрузка на сваю, кН; F_u – несущая способность грунта основания, кН; γ_n – коэффициент надежности по ответственности; $\gamma_n = 1,4$.

Несущая способность сваи на сжимающую нагрузку определялась по наименьшему значению:

$$F_u = \min(F_{u1}; F_{u2}); \quad (4)$$

$$F_{u1} = \gamma_t \cdot \gamma_c \cdot (R \cdot A_0 + R_{af} \cdot A_{af}); \quad (5)$$

$$F_{u2} = \gamma_t \cdot \gamma_c \cdot (R \cdot A_0 + R_{sh} \cdot A_{sh}); \quad (6)$$

где γ_t – коэффициент условия работы; $\gamma_t = 1,0$; γ_c – температурный коэффициент; $\gamma_c = 1,0$; R – расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи, табличное значение в зависимости от $T_{z,0}$; $R = 1641 \text{ кПа}$; A_0 – площадь опирания сваи (без учета диаметра лопасти):

$$A_0 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,426^2}{4} = 0,142 \text{ м}^2 \quad (7)$$

R_{af} – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по поверхности смерзания фундамента с учетом T_e :

$$R_{af} = \gamma_{af} \cdot R_{af}^{табл.} \cdot n_t = 0,7 \cdot 202,86 \cdot 1,0 = 141,99 \text{ кПа} \quad (8)$$

где γ_{af} – коэффициент, зависящий от вида поверхности смерзания; $\gamma_{af} = 0,7$ для стальных поверхностей; $R_{af}^{табл.}$ – табличное значение

сопротивления сдвигу по поверхности смерзания; $R_{af}^{табл.} = 202,86 \text{ кПа}$; n_t – повышающий коэффициент; принимаем $n_t = 1,0$.

A_{af} – площадь поверхности смерзания слоя грунта с боковой поверхностью свай:

$$A_{af} = \pi \cdot D \cdot (d_1 - d_{ммз}) = 3,14 \cdot 0,426 \cdot (6 - 1,5) = 6,02 \text{ м}^2 \quad (9)$$

где d_1 – глубина заложения свай; $d_1 = 6 \text{ м}$; $d_{ммз}$ – глубина многолетнемерзлых грунтов; $d_{ммз} = 1,5 \text{ м}$ R_{sh} – расчетное значение сопротивления мерзлого грунта сдвигу по грунту с учетом T_e :

$$R_{sh} = \gamma_{sh} \cdot R_{sh}^{табл.} = 1 \cdot 211,9 = 211,9 \text{ кПа} \quad (10)$$

где γ_{sh} – коэффициент сдвига по грунту; $\gamma_{sh} = 1$; $R_{sh}^{табл.}$ – табличное значение сопротивления мерзлого грунта сдвига по грунту; $R_{sh}^{табл.} = 211,9 \text{ кПа}$; A_{sh} – площадь поверхности сдвига; $A_{sh} = A_{af}$.

Подставляя в формулы (5) и (6) все исходные данные, определим наименьшее значение среди F_{u1} или F_{u2} :

$$F_{u1} = 1 \cdot 1 \cdot (1641,08 \cdot 0,142 + 141,99 \cdot 6,02) = 1089,1 \text{ кПа}$$

$$F_{u1} = 1 \cdot 1 \cdot (1641,08 \cdot 0,142 + 141,99 \cdot 6,02) = 1089,1 \text{ кПа}$$

$$F_u = \min(F_{u1}; F_{u2}) = 1089,1 \text{ кПа}$$

Суммарная сжимающая нагрузка с учетом веса свай:

$$F = N + G_{сваи} = 761,9 + 6,8 = 768,7 \text{ кН},$$

где $G_{сваи}$ – вертикальная нагрузка от веса свай $G_{сваи} = 6,8 \text{ кН}$

$$F = 768,7 \text{ кН} \leq \frac{1089,1}{1,2} = 907,6 \text{ кН} \text{ – условие выполняется.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены традиционные способы устройства дорог в условиях Крайнего Севера, имеющие целый ряд недостатков при перевозке грузов и пассажиров. Для решения представленных проблем предложено применение струнного транспорта

uST «второго» уровня. При устройстве фундаментов промежуточных опор рельсо-струнной путевой структуры в зонах вечной мерзлоты рекомендовано использовать винтовые сваи. Анализ результатов расчета показал достаточную надежность предложенной конструкции фундаментов. Коэффициент надежности по ответственности сооружения – 1,2.

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. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002.
2. Егорова Т.П., Алексеев К.И., Константинов Н.Н. Проблемы транспортного обеспечения арктической зоны Якутии // Региональная экономика: теория и практика. 2011. №23. С. 30-304. EDN: TJHXFV
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб: Научно-технологические исследования, 2022. EDN: COSHAP
4. Солуянова Т.В., Молоков В.С., Волкова Е.В. Особенности строительства и эксплуатации автомобильных дорог в условиях Крайнего Севера // Вестник науки. 2023. № 3. С. 276-283.
5. Юницкий А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии uST / Альбом. Минск: ЗАО «Струнные технологии», 2021. doi: 10.20291/2311-164X-2021-4-16-20
6. Юницкий А.Э., Артюшевский С.В. Инновационный вектор развития транспортной инфраструктуры Арктического региона России с использованием струнных технологий Юницкого. В кн.: Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития: материалы VII Международной научно-исследовательской конференции. 25–26 апреля 2024 г. Самара-Оренбург: СамГУПС, ОрИПС, 2024. С. 361-366. EDN: BRGNXI
7. Турдагина Ю.П. Винтовые сваи в вечномерзлых грунтах. В кн.: Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. EDN: TBJTND

8. Zhelezkov V.N. Development of the normative document «Design and arrangement of foundations for screw piles Bulletin of civil engineers» // Bulletin of civil engineers. 2008. Vol. 2. P. 42-46.
9. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. Силапрогс: ПНБ принт, 2019.
10. Юницкий А.Э., Цырлин М.И. Экологические аспекты струнного транспорта // Инновационный транспорт. 2020. № 2. С. 7-9. EDN: YYQLVX doi: 10.20291/2311-164X-2020-2-7-9
11. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Издательство стандартов, 2012.
12. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. М., 2020.
13. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. М.: Стандартинформ, 2007.

REFERENCES

1. Melnikova ES, Grechishcheva SE, eds. *Permafrost and development of oil and gas regions*. Moscow: GEOS; 2002. (In Russ.)
2. Egorova TP, Alekseev KI, Konstantinov NN. Problems of transport provision of the Arctic zone of Yakutia. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*. 2011(23):30-304 (In Russ.) EDN: TJHXFV
3. *The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation*. St. Pytysburg: Naukoemkie tekhnologii; 2022. (In Russ.) EDN: COSHAP
4. Soluyanov TV, Molokov VS, Volkova EV. Peculiarities of construction and operation of motorways in the conditions of the Far North. *Vestnik nauki*. 2023;(3):276-283 (In Russ.)
5. Yunitskii AE. *Innovative transport and infrastructure technologies*. Album. Minsk: Strunnye tekhnologii; 2021. (In Russ.) doi:10.20291/2311-164X-2021-4-16-20
6. Yunitskii AE, Artyushevskij SV. Innovative vector of development of transport infrastructure of the Russian Arctic region using Yunickey's structural technologies. In: *Youth science in the 21st century: traditions, innovations, development vectors: materials of the VII International scientific research conference. April 25-26, 2024*. Samara-Orenburg: SamGUPS, OrIPS – filial SamGUPS, 2024;361-366. (In Russ.) EDN: BRGHXI
7. Turdagina YuP. Vintovye svai v echnomorzlyh goruntah. In: *Youth and science: collection of materials from the Anniversary All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists with international participation, commemorating the 80th anniversary of education in Krasnoyarsk Krai*. Krasnoyarsk: Sibirskij federal'nyj un-t; 2014. EDN: TBJTND
8. Zhelezkov VN. Development of the normative document “Design and arrangement of foundations for screw piles Bulletin of civil engineers”. *Bulletin of civil engineers*. 2008;(2):42-46.

9. Yunitskii AE. *String Transport Systems: On Earth and in Space*. Silakrogs: PNB print; 2019. (In Russ.)
10. Yunitskii AE, Tsyrlin MI. Environmental aspects of string transport. *Innovacionnyj transport*. 2020;(2):7-9. (In Russ.) EDN: YYQLVX doi: 10.20291/2311-164X-2020-2-7-9
11. SP 25.13330.2012. Soil bases and foundations on permafrost soils. Moscow: Standards; 2012.
12. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya. Moscow; 2020. (In Russ.)
13. GOST 27751-88. Reliability of constructions and foundations. Principal rules of the calculations. Moscow: Standartinform; 2007. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Юницкий Анатолий Эдуардович, председатель совета директоров

и генеральный конструктор;

ORCID: 0000-0003-1574-3539;

E-mail: a@unitsky.com

Цырлин Михаил Иосифович, кандидат технических наук, ведущий специалист;

eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255;

E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

Малахов Роман Анатольевич, начальник бюро;

ORCID: 0009-0006-4876-057X;

E-mail: r.malakhov@unitsky.com

Петровец Александр Николаевич, инженер-проектировщик;

ORCID: 0009-0006-2901-183X;

E-mail: a.petrovets@unitsky.com

Information about the authors:

Anatoli E. Unitsky, Chairman of the Board of Directors and General Designer;

ORCID: 0000-0003-1574-3539;

E-mail: a@unitsky.com

Michael I. Tsyrlin, Cand. Sci. (Engineering), Leading Specialist;

eLibrary SPIN: 9548-6321; ORCID: 0000-0002-2983-3255;

E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

Roman A. Malakhov, head of the bureau;

ORCID: 0009-0006-4876-057X;

E-mail: r.malakhov@unitsky.com

Alexander N. Petrovets, design engineer;

ORCID: 0009-0006-2901-183X;

E-mail: a.petrovets@unitsky.com

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst679911>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© К.К. Ким¹, С.Н. Иванов², С.И. Щетинин²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет

(Комсомольск-на-Амуре, Россия)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УДАЛЕННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Обоснование. Повышение качества и надежности элементов канализации и транспорта электроэнергии в системах электроснабжения.

Цель. Разработка методики прогнозирования процессов, протекающих в системах изоляции кабельных конструкций на основе современных электроизоляционных материалов с учетом влияния определяющих параметров внешней среды в условиях ограниченного доступа.

Материалы и методы. Исследование процессов деструкции элементов изоляции основывается на законах кинетики химических реакций. Анализ и систематизация результатов, полученных с использованием теории надежности и математической статистики, реализованы методами математического, имитационного и физического моделирования.

Результаты. Получены аппроксимирующие зависимости, устанавливающие связь между критериями отказа систем изоляции и основными проектными параметрами. Проведена верификация и доказана применимость предложенного подхода для прогнозирования работоспособности удаленных изоляционных систем на основе информации, получаемой при поставке кабельных изделий.

Заключение. Предложенная методика позволяет определять эксплуатационную надежность изоляции на стадии проектирования и изготовления кабельной конструкции с учетом качества изоляции в состоянии поставки, устойчивости к технологическим воздействиям и конструктивным параметрам труднодоступных или удаленных объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: кабельная конструкция; система изоляции; испытательное напряжение.

Как цитировать:

Ким К.К., Иванов С.Н., Щетинин С.И. Прогнозирование работоспособности удаленных изоляционных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 219–229. doi: 10.17816/transsyst679911

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© K.K. Kim¹, S.N. Ivanov², S.I. Shchetinin²¹ Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university
(St. Petersburg, Russia)² Komsomolsk-na-Amur State University
(Komsomolsk-on-Amur, Russia)**PREDICTING THE PERFORMANCE
OF REMOTE INSULATOR SYSTEMS**

BACKGROUND. Improving the quality and reliability of power channeling and transfer elements of power supply systems.

AIM. To develop a method to predict processes occurring in cable insulation systems based on advanced insulation materials and the key environmental parameters in limited access conditions.

MATERIALS AND METHODS. The processes of destruction of insulation elements are studied based on chemical kinetics laws. The results obtained using reliability theory and mathematical statistics methods are analyzed and classified by mathematical, simulation, and physical modeling.

RESULTS. We determined approximated dependencies that connect the failure criteria of insulation systems and the key design parameters. The authors verified and proved the applicability of the proposed approach to predict the performance of remote insulation systems based on information provided during the wiring delivery.

CONCLUSION. The proposed method allows determining the operational reliability of insulation at the design and manufacturing stage of a cable structure based on the insulation quality in the as-delivered condition, resistance to process influences and design parameters of hard-to-reach or remote power generation facilities.

Keywords: cable structure; insulation system; test voltage.

To cite this paper:

Kim KK, Ivanov SN, Shchetinin SI. Predicting the Performance of Remote Insulator Systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):219–229. doi: 10.17816/transsyst679911

ВВЕДЕНИЕ

Повышение защищенности элементов канализации и транспорта электроэнергии может быть обеспечено заменой части воздушных линий электропередачи кабельными трассами, предназначенными для питания энергетического оборудования, например, морских платформ, насосных или компрессорных механизмов, работающих под водой, транспорта электроэнергии в места, не имеющие собственных источников (удаленные районы, острова). В первую очередь, это связано с применением кабельных конструкций с изоляцией из сшитого полиэтилена при напряжении 110–330 кВ.

Одним из таких примеров является высоковольтная линия NorNed длиной 580 км с расчетной пропускной мощностью 700 МВт. Отечественный подводный кабель КВВ переменного напряжения 450...750 В и частотой до 400 Гц предназначен для использования и непрерывной эксплуатации в течение 6 лет насосов прокачки скважин при давлении 7 МПа и температуре $-40...+70^{\circ}\text{C}$. Кабель марки АПвП2г имеет броню из алюминия, изоляционный слой – сшитый полиэтилен, внутреннюю полиэтиленовую оболочку. Кабель предназначен для прокладки под водой, рабочие температуры $-60...+50^{\circ}\text{C}$, срок службы 30 лет.

Прокладка таких трасс предполагает их размещение в удаленных и труднодоступных местах, том числе, и в водных акваториях. Например, в 2024 году по информации пресс-службы электросетевого холдинга энергообъектов Группы «Россети» с целью демонтажа старых и прокладки новых кабелей на реках Москвы и Санкт-Петербурга оперативно-ремонтный персонал компании провел около 2 тысяч часов под водой [1–4].

В отечественной и зарубежной литературе накоплен достаточно большой объем информации об отказах элементов изоляции электрических систем при эксплуатации [5–14]. Однако, проведение таких научных исследований, как на макетах, так и на реальных конструкциях систем изоляции требует существенных временных и материальных затрат.

Вопрос прогнозирования работоспособности удаленных изоляционных систем является актуальной проблемой. Поэтому наряду со статистическими данными, важным направлением в области системной надежности является прогнозирование эксплуатационной надежности изоляции на стадии проектирования, основанное на имеющемся объеме информации об отказах элементов изоляции, о кинетике и динамике их износа (старения) при эксплуатации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Последовательность и взаимосвязь процессов, обуславливающих электрическое старение и пробой изоляции, можно представить следующим образом: инкубационная стадия старения (инжекция, экстракция и увеличение носителей зарядов, химическая деградация, образование и развитие микротрещин и микрополостей), дендритная стадия (развитие частичных разрядов с зарождением дендритов и их последующим ростом) и пробой в виде образования высокопроводящего канала.

Причины старения изоляции обусловлены совокупностью физических и химических процессов, происходящих в полимерном материале и приводящих к необратимым изменениям его свойств: развитие частичных разрядов при перенапряжении и рабочем напряжении; тепловая деструкция материала; увлажнение изоляции и водный триинг (рост древовидных насыщенных водой фигур); повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

В силу того, что причиной большинства отказов является пробой основной изоляции, то в первую очередь необходимо рассмотреть математическую модель ее надежности. Такая модель может быть создана на основе так называемой модели наиболее «слабого звена», широко используемой в теории надежности [15].

Непосредственной причиной пробоя изоляции в большинстве случаев являются коммутационные перенапряжения, возникающие при переходных процессах, в частности вследствие среза тока при быстром охлаждении дуги в выключателе.

Максимальная величина перенапряжения может быть найдена из уравнения:

$$U_{max} = I_{cp} z_v$$

где: U_{max} – амплитуда перенапряжения, В; I_{cp} – ток среза, А, z_v – волновое сопротивление, Волновое сопротивление кабелей приводится в технических характеристиках и приближенно составляет 50...100 Ом.

Величина и форма коммутационных перенапряжений зависят от волновых параметров кабеля, свойств выключателя, скорости изменения тока и напряжения и других факторов. Следует отметить, что волновые параметры практически не зависят от величины воздействующего напряжения. При, обычно имеющей место, длительности переднего фронта волны импульсных напряжений, больше $7 \cdot 10^{-3}$ с, максимальные напряжения распределяются практически равномерно.

Распределение коммутационных перенапряжений кратностью K может быть представлено в виде суперпозиции усеченного нормального распределения со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,2$ и усеченного распределения Коши:

$$g(K) \approx 0.4e^{-12.5(K-1)^2} + 0.335(1 + (K-3))^{-2}$$

Распределение пробивного напряжения изоляции $U_{\text{пр}}$ Вейбулла имеет вид:

$$F(U_{\text{пр}}) = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\text{пр}}^k}{U_0^k}\right).$$

Параметры распределения Вейбулла U_0, k можно определить только экспериментальным путем. Будучи однажды получены для изоляции определенного типа, эти параметры могут быть использованы для расчета надежности аналогичных кабельных изделий при условии сохранения марки кабеля, вида пропитывающего состава, технологии изготовления.

Другой подход возможен при расчете надежности изоляции для периода приработки. В этот период основной причиной отказов является наличие дефектов изоляции, которые могут быть обусловлены как нарушениями технологии производства применяемых материалов, так и повреждениями, причиняемыми изоляции в процессе изготовления изоляционной системы.

Полагая, что значения пробивного напряжения поврежденных участков имеют нормальное распределение, можно найти количество образцов с поврежденной изоляцией в общей совокупности:

$$n_{\text{пр}} = 2n_1,$$

где n_1 – число образцов, пробитых напряжением, меньшим U_1 .

Если максимальное электрическое напряжение составляет $U_1 + 3\sigma_1$, а электрическая прочность в поврежденном месте $E_{\text{п}}$, то элементарный участок изоляции, перекрытие которого по поверхности при данных условиях возможно, может быть представлен в виде круга радиусом r_{δ}

$$r_{\delta} = U_1 + 3\sigma_1$$

и площадью $S_{\text{эл}}$

$$S_{\text{эл}} = \pi r_{\delta}^2.$$

Число элементарных участков на образце кабеля

$$m = \pi d_{\text{из}} l_{\text{обр}} / S_{\text{эл}},$$

где $d_{\text{из}}$ – диаметр изоляции; $l_{\text{обр}}$ – длина образца.

Достоинством методики расчета надежности изоляции по дефектности провода является возможность получения исходных данных в процессе проведения пуско-наладочных работ. Вместе с тем испытания образцов провода дешевле и практичнее испытаний кабельных конструкций в сборе. Однако достоверность характеристик электрической прочности изоляции, полученных таким образом, будет низкой. Для повышения достоверности результатов испытания желательно проводить если не на реальных образцах, то по крайней мере на макетах с имитацией технологического процесса укладки кабеля.

Методика расчета надежности изоляции по дефектности кабеля не учитывает явлений старения изоляции. Для расчета долговечности необходимо знать изменения характеристик изоляции по мере ее старения. С этой целью должны быть проведены опыты по определению дефектности изоляции как функции времени работы.

Оценка надежности изоляции основывается на знании распределения пробивных напряжений изоляции в состоянии поставки, а также параметров приемника электроэнергии.

Практикой экспериментального исследования установлено, что распределение пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ электрической изоляции, как правило, описывается нормальным законом распределения

$$F(U_{\text{пр}}) = \Phi(U_{\text{пр}i} - U_{\text{пр}} / \sigma),$$

где Φ – функция Гаусса, $U_{\text{пр}i}$ – среднее пробивное напряжение, определяемое по результатам i -го испытания образцов изоляции на пробой.

Исходными данными для расчета являются номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, напряжение пробоя U_1 , среднеквадратическое отклонение σ , класс нагревостойкости.

Согласно многочисленным исследованиям процессы термоокислительной деструкции полимеров подчиняются законам кинетики химических реакций, поэтому при постоянстве условий эксплуатации или испытаний параметры распределения пробивного напряжения изоляции уменьшаются во времени по экспоненциальному

закону. Функция распределения $F(U_{\text{пр}})$ для всего объема изоляции определяется в зависимости от кратности площади изоляции, времени и температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ параметров распределения $U_{\text{пр}}$ изоляционных конструкций различных классов нагревостойкости, полученных при увеличении температуры до предельного для данного класса нагревостойкости значения, показывает, что изменение параметров $U_{\text{пр}}$ достаточно точно можно аппроксимировать линейными зависимостями:

$$U_{\text{пр}} = U_1(1 - k_1(T_{\text{раб}} - T_0))k_2 \cdot k_3,$$

где $T_{\text{раб}}$, T_i – расчетная температура и температура изоляции при испытаниях; k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты, учитывающие соответственно температуру, время и площадь поверхности изоляции.

Дополнительно установлено, что при увлажнении изоляции наблюдается увеличение коэффициента импульсных перенапряжений для всех длительностей фронта, так как пробивное напряжение на промышленной частоте снижается намного быстрее, чем импульсное. Для новой изоляции среднее пробивное напряжение на промышленной частоте после увлажнения уменьшается приблизительно в 1,85 раза, для изоляции находящейся в эксплуатации – в 3,05 раза, а импульсное пробивное напряжение – соответственно в 1,16 и 1,5 раза. Влияние увлажнения сказывается сильнее на системах изоляции, бывших длительное время в эксплуатации.

Для оценки точности расчета надежности по вышеизложенной методике проведено сравнение результатов расчета с результатами их нормальных испытаний на ограниченной выборке при номинальном уровне воздействующих факторов (Рис.).

Исследования по определению среднего пробивного напряжения витковой изоляции проводились на установке Метерон ИСП/М-30, предназначенной для испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Рассчитанные значения вероятности безотказной работы изоляции находятся внутри доверительного интервала, полученного по результатам испытаний, что свидетельствует о соответствии результатов расчета и испытаний.

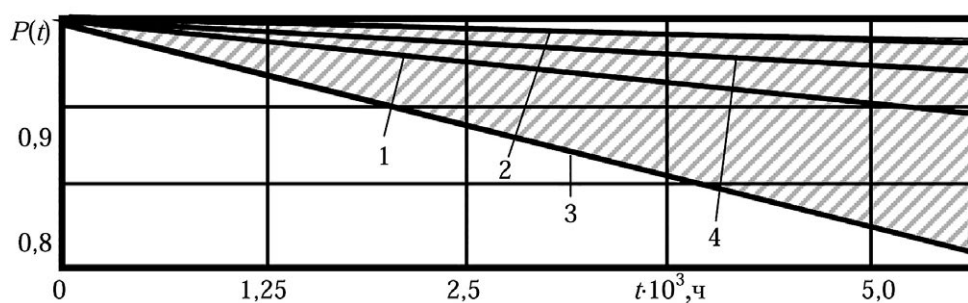


Рис. Линейные регрессии вероятности безотказной работы:
1 – экспериментальная зависимость; 2, 3 – ее доверительные границы;
4 – расчетная зависимость

Fig. Linear regressions of the probability of failure-free operation:
1 – experimental dependence; 2, 3 – its confidence limits; 4 – calculated dependence

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика экспертного прогнозирования вероятности безотказной работы изоляции кабельных конструкций, основанная на модели «слабого звена» с использованием распределения пробивных напряжений. Данные по надежности изоляции, полученные по рассмотренной методике, согласуются с данными, полученными на реальных кабельных конструкциях. Рассмотренный подход позволяет произвести прогноз эксплуатационной надежности изоляции на стадии проектирования и изготовления кабельной конструкции с учетом качества изоляции в состоянии поставки, устойчивости к технологическим воздействиям и конструктивным параметрам объекта электроэнергетики. Рассмотренный метод позволяет обосновать выбор конструктивного исполнения, технологии изготовления, способа электромонтажа и испытаний кабельных конструкций, направленный на повышение показателей надежности электротехнических комплексов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант Российского научного фонда № 24-29-00089).

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. Энергетика и промышленность России. Дата обращения: 28.04.2025. Режим доступа: https://www.eprussia.ru/news/base/2025/4914544.htm?sphrase_id=10486854
2. Петрова Е.В., Гиршин С.С., Криволапов В.А. и др. Анализ потерь в защищенных и неизолированных проводах в стационарных режимах с учетом погодных условий // Омский научный вестник. 2024. № 3(191). С. 99-109. doi: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109
3. Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. и др. Оценка параметров тепловых режимов кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 6. С. 55-68. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6- 55-68
4. Мартыненко Т.С., Овсиенко В.Л., Сливов А.А., Шувалов М.Ю. ИЦ ВНИИКП. Испытания: необходимость, обусловленная требованиями безопасности и потребностями развития // Кабели и провода. 2022. № 4. С. 5-15. doi: 10.52350/2072215X_2022_4_5
5. Садирова С.Н. Изучение свойства сшитого полиэтилена // Международный журнал передовых технологий и естественных наук. 2022. № 1. С. 56-60. doi: 10.24412/2181-144X-2022-1-56-60
6. Ткаченко В.А., Кропотин О.В., Шепелев А.О., Кропотин В.О. Математическая модель кабельной линии электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена при подземной прокладке // Омский научный вестник. 2018. № 6(162). С. 137-141. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-137-141
7. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 146-155. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
8. Ветлугаев С.С., Горобец А.Н., Макаров Л.Е. и др. Опыт испытаний кабелей и арматуры высокого и сверхвысокого напряжения // Кабели и провода. 2022. № 3. С. 9-15. doi: 10.52350/2072215X_2022_3_9
9. Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И. и др. Методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 4. С. 65-74. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74
10. Шувалов М.Ю. Применение микрофлуоресцентного анализа в исследовании качества и надёжности силовых кабелей среднего и высокого напряжения // Кабели и провода. 2023. № 1. С. 3-14. doi: 10.52350/2072215X_2023_1_3
11. Боев М.А., Чуньюй Суй, Чжунго Гао. Исследование устойчивости к трекингу изоляционных материалов // Кабели и провода. 2023. № 3. С. 24-28. doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
12. Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А. Необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей // Известия

- высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т.25. № 5. С. 59-73. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73
13. Барашков О.К. Итоги эволюции рынка общепромышленных ПВХ пластикатов на конец 2022 года // Кабели и провода. 2023. № 3. С. 3-24. doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
14. Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т.26, № 4. С. 89-99. doi: 10.30724/1998-9903 2024-26-4-89-99
15. Иванов С.Н., Скрипилев А.А. Надежность электроснабжения. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022.

REFERENCES

1. Energy and industry of Russia. [Internet]. Cited 2025 March 24. Available from: <https://www.eprussia.ru/news/base/2025/2580965> (In Russ.)
2. Petrova EV, Girshin SS, Krivolapov VA, et al. Analysis of losses in protected and uninsulated wires in stationary modes taking into account weather conditions. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024;3(191):99-109. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109
3. Tsitson II, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Petrova RM, Abdullin LI. Evaluation of parameters of thermal modes of 10 kV cable lines under various operating conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2024;26(6):55-68. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68
4. Martynenko TS, Ovsienko VL, Slivov AA, Shuvalov MYu. JSC VNIKP. Testing center. Tests: necessity stipulated by safety requirements and development needs. *Cables and wires*. 2022;4:5-15. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2022_4_5
5. Sadirova SN. Studying the properties of crosslinked polyethylene. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2022;1:56-60. (In Russ.) doi: 10.24412/2181-144X-2022-1-56-60
6. Tkachenko VA, Kropotin OV, Shepelev AO, Kropotin VO. Mathematical model of a cable power transmission line with cross-linked polyethylene insulation for underground installation. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;6(162):137-141. (In Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-137-141
7. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, Sharyapov AM. Digital power lines faults monitoring system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2021;23(1):146-155. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155
8. Vetlugaev SS, Gorobets AN, Makarov LE, et al. Hv and ehv cables and accessories test experience. *Cables and wires*. 2022;3:9-15. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2022_3_9
9. Tsitson II, Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, et al. Method of calculation of temperature parameters and service life of 10 kV cable lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. ENERGY PROBLEMS*. 2024;26(4):65-74. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74

10. Shuvalov MYu. The use of fluorescence microscopy analysis in the investigation of quality and reliability of medium and high voltage power cables. *Cables and wires*. 2024;1:3-14. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_1_3
11. Boev MA, Chunyu Sui, Junguo Gao. Investigation of resistance to tracking of insulation materials. *Cables and wires*. 2023;3:24-28. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
12. Shushpanov IN, Permyakova DN, Konyukhov VYu, Oparina TA. The need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-siberian highways. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2023;25(5):59-73. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73
13. Barashkov OK. The results of the evolution of the general purpose industrial PVC plastics market at the end of 2022. *Cables and wires*. 2023;3:3-24. (In Russ.) doi: 10.52350/2072215X_2023_3_24
14. Balobanov RN, Bulatova VM, Kryuchkov NS, Shafikov II. Optimization of monitoring systems power cable lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2024;26(4):89-99. (In Russ.) doi: 10.30724/1998-9903_2024-26-4-89-99
15. Ivanov SN, Skripilev AA. Reliability of power supply. Vologda: Infra-Engineering; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Иванов Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 6503-7849; ORCID: 0000-0002-9964-9111;
E-mail: snivanov57@mail.ru

Щетинин Станислав Игоревич, магистрант;
eLibrary SPIN: 9537-4042; ORCID: 0009-0001-6807-5880;
E-mail: stazzkom@gmail.com

Information about the authors:

Konstantin K. Kim, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Sergey N. Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 6503-7849; ORCID: 0000-0002-9964-9111;
E-mail: snivanov57@mail.ru

Stanislav I. Shchetinin, master's student;
eLibrary SPIN: 9537-4042; ORCID: 0009-0001-6807-5880;
E-mail: stazzkom@gmail.com

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681998>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© И.М. Карпова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ СВОЙСТВ ГРУНТА

Цель. Разработка модели расчета сопротивления заземлителей с учетом нелинейных свойств грунта при различных внешних воздействиях, в том числе ударах молнии.

Материалы и методы. Для построения модели использован пакет ELCUT 6.5, позволяющий реализовать связанную нестационарную модель растекания тока и теплопередачи. Рассмотрено применение модели для решения трех задач исследования сопротивления одиночного вертикального заземлителя – в однородном грунте при действии грозового импульса, с учетом фундамента опор в неоднородном грунте и с учетом влияния температуры и влажности в однослойном грунте.

Результаты. Разработанная модель позволяет учесть все влияющие на удельное сопротивление грунта факторы и рассчитать значения сопротивления заземляющего устройства с их учетом. Результаты моделирования получили подтверждение при сопоставлении с работами других авторов.

Ключевые слова: система грозозащиты; заземляющее устройство; сопротивление растеканию тока; моделирование; ELCUT.

Как цитировать:

Карпова И.М. Исследование сопротивления заземлителей с учетом нелинейности свойств грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 230–245. doi: 10.17816/transsyst681998

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **I.M. Karpova**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

GROUNDING RESISTANCE: A STUDY BASED ON NONLINEARITY OF SOIL PROPERTIES

AIM. To develop a model to calculate the resistance of ground electrodes based on nonlinear soil properties under various external influences, including lightning strikes.

MATERIALS AND METHODS. ELCUT 6.5 software was used to build the model as it allows to implement a coupled, non-stationary current spreading and heat transfer model. The authors discuss the use of the model to solve three problems of the resistance of a single vertical ground electrode; in homogeneous soil under the influence of a lightning impulse, tower footing in heterogeneous soil, and temperature and humidity in single-layer soil.

RESULTS. The developed model allows to consider all factors influencing the specific soil resistance and calculate the resistance of the grounding device based on them. Modeling outputs were confirmed by comparing with the papers of other authors.

Keywords: lightning protection system; grounding device; current spreading resistance; modeling; ELCUT.

To cite this paper:

Karpova IM. Grounding Resistance: A Study Based on Nonlinearity of Soil Properties. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):230–245. doi: 10.17816/transsyst681998

ВВЕДЕНИЕ

Заземляющие устройства (ЗУ) являются одним из важнейших элементов энергетических систем и оборудования высокого напряжения. Правильно выбранное заземляющее устройство обеспечивает надежность работы электрооборудования не только в номинальном режиме, но и обеспечивает защиту при аварийных режимах, в частности, от грозовых перенапряжений.

В задачах грозозащиты величина сопротивления заземлителей опор линий электропередачи в значительной мере определяет надежность работы энергосистемы [1, 2]. Это связано с тем, что в силу своей протяженности воздушные линии электропередачи наиболее часто подвергаются воздействию атмосферных перенапряжений.

Основными источниками грозовых перенапряжений на изоляции линии являются попадание прямых разрядов в фазный провод, в опору или трос вблизи опоры, а также индуктированные перенапряжения вследствие удара молнии в землю вблизи линии [3]. Индуктированные перенапряжения на проводах линии могут достигать опасных значений лишь в линиях классов 6–35 кВ и в данной работе рассматриваться не будут.

Импульсный ток, образованный в результате прямого удара молнии в заземленную опору линии, создает падение напряжения в сопротивлении заземления, которое полностью приложено к изоляции и представляет для нее наибольшую опасность. Величина падения напряжения помимо параметров разряда молнии определяется значением сопротивления заземления.

Удар молнии в вершину опоры линии или в трос вблизи опоры также является источником перенапряжения, которое может привести к отключению линии. Согласно [3] потенциал на вершине опоры определяется падением напряжения на сопротивлении заземления u_R , падением напряжения на теле опоры u_Z , а также наведенной составляющей напряжения из-за электромагнитной индукции между телом опоры и каналом молнии $u_{\text{оп-м}}$:

$$u_{\text{оп}} = u_R + u_Z + u_{\text{оп-м}}. \quad (1)$$

Напряжение на гирлянде равно разности напряжений на опоре и фазном проводе. Обратное перекрытие изоляции произойдет, если напряжение на гирлянде превысит ее импульсную прочность,

определяемую вольт-секундной характеристикой гирлянды. Результаты, опубликованные в работах [4, 5], показывают, что наиболее значимый вклад в формирование напряжения на гирлянде изоляции вносит падение напряжения на сопротивлении заземления. Соответственно вероятность обратного перекрытия при фиксированных параметрах молниевых разрядов в значительной степени определяется электромагнитными параметрами ЗУ опоры.

Волны перенапряжений, сформировавшиеся на проводах линии в результате обратных перекрытий или прорывов молнии мимо грозозащитных тросов, при набегании на подстанцию могут представлять большую опасность для установленного там высоковольтного оборудования. При организации грозозащиты подстанции с помощью нелинейного ограничителя перенапряжения эффективность действия последнего также определяется электромагнитными параметрами ЗУ.

В работе [6] экспериментальным и расчетным путем показано существенное увеличение остающегося напряжения на оборудовании по сравнению с паспортными данными за счет влияния импеданса цепи заземления. Этот процесс сопровождается формированием волны напряжения с высокой крутизной нарастания, что представляет опасность для некоторых широко применяемых типов внутренней изоляции высоковольтного оборудования.

В частности, действие импульса напряжения с высокой крутизной на маслонаполненное оборудование вызывает пробой масляного промежутка, который оставляет необратимый след на твердой изоляции, приводящий впоследствии, под действием рабочих напряжений, к развитию скользящих или ползущих разрядов.

Сопротивление ЗУ состоит из сопротивления заземляющих элементов (стержневых заземлителей, горизонтальных полос и т.д.) и сопротивления растеканию тока, причем последнее, определяемое удельным сопротивлением грунта, играет решающую роль.

В частности, в районах Крайнего Севера, на Кольском полуострове традиционные мероприятия по молниезащите высоковольтных линий и подстанций 35–150 кВ не обеспечивают необходимую величину показателя надежности в связи с низкой проводимостью грунта. Для решения этой проблемы применяют особые схемы защиты, связанные с отказом от грозозащитных тросов, установкой дополнительных защитных аппаратов (ОПН) и использованием современных защитных средств (например, мультикамерных разрядников) [7].

Определяющее влияние заземляющих устройств на формирование схем молниезащиты высоковольтных объектов требует подробного исследования процессов растекания тока от заземлителей. При этом необходимо обеспечить возможность отслеживать изменение свойств заземлителей в режиме реального времени и оценивать влияние параметров грунтов и конструкции заземлителей. Эта задача может быть решена посредством компьютерного моделирования.

При исследовании параметров заземлителей большое распространение получили модели, построенные на детализированных схемах замещения протяженных заземлителей [8–11]. При довольно коротких грозовых импульсах тока систему заземлителя можно рассматривать как цепь с распределенными параметрами, среди которых наиболее важное значение имеют удельные проводимость, индуктивность и емкость. Влияние емкости (емкость электрода относительно нулевого потенциала) заметно лишь при высоких значениях удельного сопротивления грунта и кратковременных процессах. Для грунтов с удельным сопротивлением менее 1000 Ом·м даже при микросекундных импульсах емкостные токи пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости. В этом случае схема замещения будет содержать только индуктивности и проводимости. Если длительность фронта импульса тока больше длительности переходного процесса в заземлителе, то к моменту максимума тока молнии переходный процесс в заземлителе практически заканчивается. Заземлители, удовлетворяющие этому условию, можно рассматривать как сосредоточенные и характеризовать их стационарным значением сопротивления растекания.

Использование эквивалентных цепных схем замещения позволяет учесть в моделях не только неоднородную слоистую структуру грунта, но и его нелинейные свойства, вызванные ионизацией вблизи электрода вследствие достаточно сильного электрического поля. Вместе с тем, формирование подробной модели грунта приводит к существенному усложнению топологии цепной модели заземлителя, затрудняющему процедуру решения. Кроме того, использование различных упрощений и идеализаций при описании процесса ионизации, обеспечивая хорошее совпадение с экспериментальными данными в одних задачах, дает значительные неточности в других [11].

В связи с этим более предпочтительным является построение полевой модели заземлителя.

Появление профессиональных программных комплексов таких как ANSYS, COMSOL MULTIPHYSICS, FEMM, ELCUT, позволяющих решать электромагнитные, тепловые, механические и другие задачи, а также проводить решение связанных задач из разных областей физики существенно упростили процесс разработки модели.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Основными факторами, влияющими на величину удельного электрического сопротивления грунта, являются:

- Влажность грунта: как правило, чем больше влажность, тем ниже удельное сопротивление грунта.
- Температура: чем ниже температура, тем выше удельное сопротивление грунта.
- Состав и размер фракций грунта: чем больше фракция, тем выше удельное сопротивление грунта.
- Концентрации солей, щелочей и кислот: чем выше концентрация соли в почве, тем ниже удельное сопротивление грунта.

В зависимости от этих факторов удельное сопротивление грунтов изменяется в очень широких пределах.

Согласно [12] даже для однородных сред пределы изменения удельных сопротивлений составляют 100–1500 Ом·м для песчаных грунтов, 2000–10000 Ом·м для скальных пород (сланцы, гранит). Относительная диэлектрическая проницаемость сухого песка составляет $\epsilon_r = 2,5$, для гранита $\epsilon_r = 4,5 - 9$.

Результаты исследований, приведенные в работе [13], показали, что для однородных грунтов наиболее важными факторами, влияющими на величину удельного сопротивления, являются влажность и температура, а при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать слоистость грунтов, пористость и климатическую зону, в которой предполагается разместить ЗУ. В течение года наиболее резкие колебания удельного сопротивления наблюдаются в верхних слоях земли, которые зимой промерзают, а летом высыхают. Из данных измерений следует, что при понижении температуры воздуха от 0 до -10°C удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза. Использование для расчета заземляющих устройств упрощенных методик приводит к существенным отклонениям расчетных значений сопротивлений от экспериментальных.

Следовательно, для повышения точности расчет сопротивления заземлителей необходимо выполнять с учетом многослойности грунта, изменений погодных условий и уровня залегания грунтовых вод. При построении компьютерной модели заземлителя это означает использование нелинейных характеристик для описания свойств грунтов.

Осевая симметрия, характерная для процессов растекания тока в вертикальном стержневом заземлителе, позволяет выполнить моделирование в пакете ELCUT 6.5. Следует отметить, что несмотря на ряд преимуществ ELCUT по сравнению с более мощными пакетами, среди которых высокая скорость решения и нетребовательность к ресурсам компьютера, основным его недостатком является неспособность моделировать трехмерные объекты, тогда как наличие осевой симметрии сводит трехмерную задачу к двумерной.

Процесс растекания токов был описан как задача нестационарного электрического поля. В этой постановке источники поля (напряжения или токи) могут быть произвольными функциями времени, а электрические свойства материалов могут зависеть от напряженности электрического поля.

Уравнение для электрического потенциала U имеет вид:

$$-\nabla \cdot (\gamma(E) \cdot \nabla U) - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot (\epsilon(E) \cdot \nabla U) = 0, \quad (2)$$

где электропроводность γ и диэлектрическая проницаемость ϵ могут зависеть от напряженности электрического поля E , ∇ обозначает оператор Набла.

Напряженность электрического поля определяется пространственным распределением потенциала:

$$\vec{E} = -\nabla U,$$

плотность тока проводимости законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j}_{\text{пр}} = \gamma \vec{E},$$

плотность тока смещения

$$\vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \vec{E}).$$

При выполнении расчетов с помощью встроенного калькулятора можно рассчитать удельную мощность Джоулевых потерь, определяемых плотностью тока проводимости

$$q = \vec{j}_{\text{пр}} \cdot \vec{E}$$

и передать их в задачу нестационарной теплопередачи, представленной уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) = q, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, T – температура, t – время.

Расчетная область задачи, описанной дифференциальными уравнениями в частных производных (2) и (3), должна иметь конечные размеры, которые выбираются таким образом, чтобы не оказывать значительного влияния на результат. Схема геометрии расчетной области, построенная в цилиндрической системе координат (z, r) , приведена на Рис. 1. Следует отметить, что ось вращения в ELCUT всегда расположена горизонтально.

Электропроводность грунта является определяющей характеристикой данного исследования. Сопротивление растеканию тока с заземлителя в землю формируется всей областью растекания от поверхности заземлителя до зоны, в которой электрический потенциал практически равен нулю. Сам заземлитель в силу высокой по сравнению с грунтом проводимостью в расчет не включается.

На всех внешних границах расчетной области задаются граничные условия.

Для уравнения растекания тока (2) в качестве внешнего воздействия на поверхности заземлителя задается временная зависимость потенциала, которая при имитации грозового импульса имеет вид

$$U(t) = U_m \cdot \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{ф}}}} - e^{-\frac{t}{T_{\text{и}}}} \right),$$

где U_m – определяет наибольшее значение напряжения, $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{и}}$ – длительность фронта и длительность импульса соответственно.

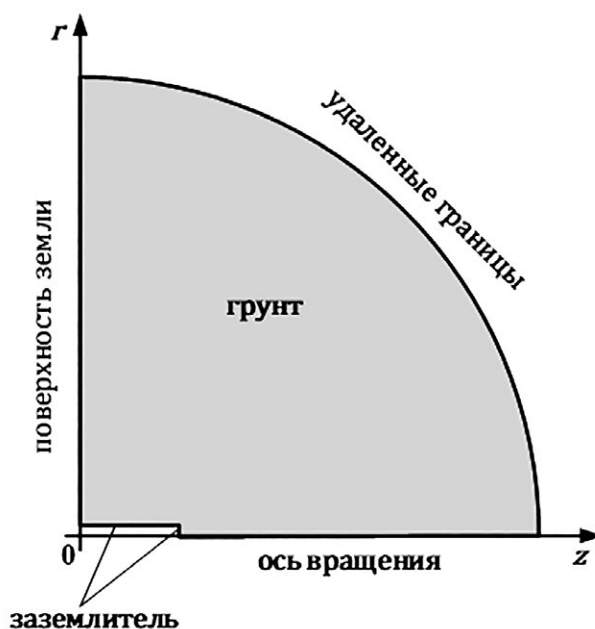


Рис. 1. Геометрия расчетной модели

Fig. 1. The calculation model geometry

Для внешних воздействий другой формы могут быть использованы любые временные зависимости.

На удаленной границе расчетной области задается нулевой потенциал, на поверхности земли и оси вращения – равенство нулю нормальной компоненты плотности тока.

Для нестационарного уравнения теплопроводности (3) на всех границах кроме поверхности земли задается равный нулю тепловой поток через границу, на поверхности земли – условие конвекции, параметрами которого являются коэффициент теплоотдачи с поверхности α и температура окружающей среды T_0 :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0),$$

$\frac{\partial T}{\partial n}$ описывает нормальную компоненту плотности теплового потока, T – температуру, которую удобнее задавать в градусах Цельсия.

Температура окружающей среды и начальное значение температуры во всех точках расчетной области принимались равными. Базовое значение соответствовало 0°C , отдельные расчеты были проведены для $+10^\circ\text{C}$ и для -10°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Моделирование одиночного вертикального заземлителя в однородном грунте при действии грозового импульса. Основной задачей этого исследования являлось подтверждение достоверности получаемых по описанной модели результатов. Постановка такой задачи не требовала рассмотрения тепловых процессов в грунте и ограничивалась лишь уравнением (2) с соответствующими граничными условиями.

Было проведено моделирование вертикального заземлителя длиной 5 м в грунте с удельным сопротивлением 500 Ом·м (проводимостью 0,002 См/м) при изменении относительной диэлектрической проницаемости грунта в диапазоне от 1 до 25. Параметры грозового импульса соответствовали работе [14]:

$$U_m = 200 \text{ кВ}, T_{\phi} = 0,5 \text{ мкс}, T_{\text{и}} = 67 \text{ мкс}.$$

Для каждого рассчитанного варианта посредством интегрального калькулятора ELCUT был вычислен ток, стекающий с заземлителя. На Рис. 2 отражены результаты проведенных расчетов.

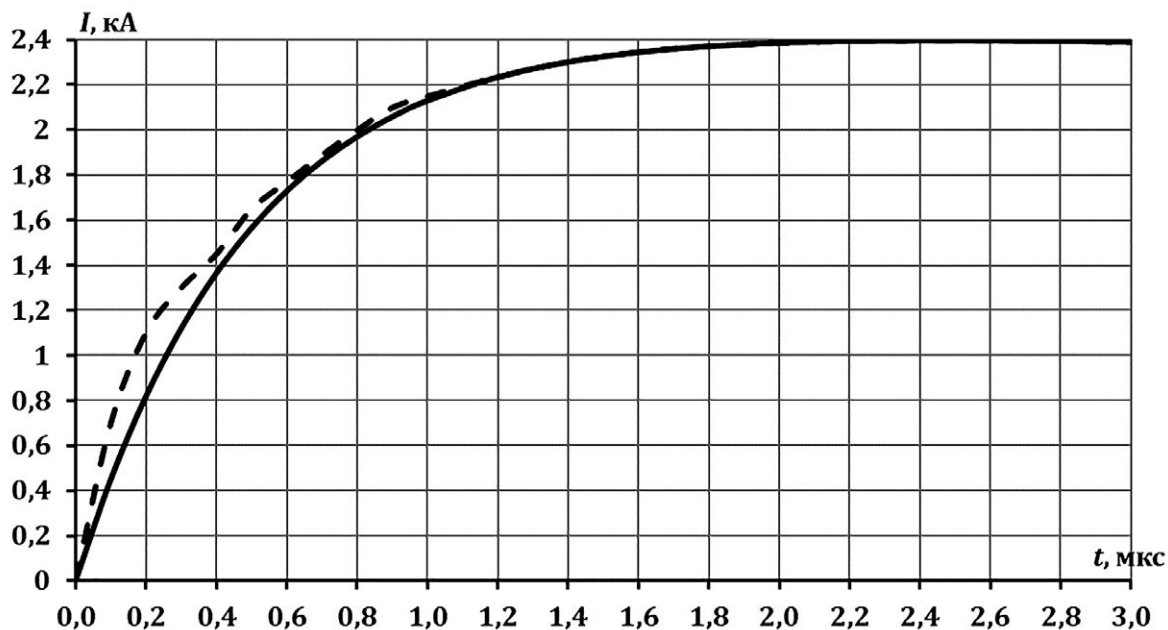


Рис. 2. Изменение во времени тока с вертикального заземлителя длиной 5 м, при грозовом импульсе напряжения и разных значениях диэлектрической проницаемости грунта: сплошная линия $\epsilon_r = 1$, пунктирная – $\epsilon_r = 25$

Fig. 2. Time variation of the current from a vertical grounding conductor with a length of 5 m, with a lightning voltage pulse and different values of soil permittivity: solid line $\epsilon_r = 1$, dotted line – $\epsilon_r = 25$

Полученные в исследовании результаты были сопоставлены с данными, опубликованными в работе [14]. В ней было рассмотрено моделирование волновых процессов вертикального электрода в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS с такими же исходными данными. Интерес к этой работе был вызван тем, что результаты компьютерного моделирования в ней были подтверждены результатами натурного эксперимента.

Полученные с помощью модели ELCUT результаты соответствуют данным работы [14], расхождение не превышает 2%.

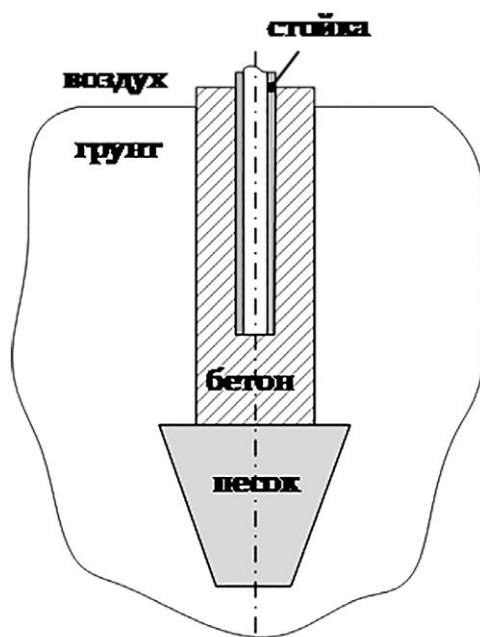
Приведенные на Рис. 2 зависимости показывают, что увеличение диэлектрической проницаемости грунта ведет к возникновению волновых процессов в заземлителе. Появление колебательной высокочастотной составляющей в временной зависимости тока при $\epsilon_r = 25$ связано с увеличением доли тока смещения. Однако при малых сопротивлениях этот процесс выражен довольно слабо, и задача может быть рассмотрена как квазистационарная.

Моделирование сопротивления заземления фундамента опор в неоднородном грунте. Описанная модель растекания токов ELCUT была применена для анализа влияния на сопротивление заземления слоистых грунтов. Такие исследования были проведены применительно к заземлителям различного конструктивного исполнения на основе фундаментов опор, описанных в [15, 16]. В качестве внешнего воздействия при решении этих задач использовалось синусоидальное напряжение различной частоты (от 50 до 5000 Гц). Для сопоставления с результатами работы [15] в геометрии задачи была воспроизведена сложная структура фундамента опоры, включающая в себя помимо грунта опорную стойку, бетонное основание самого заземлителя и песчаную подушку (Рис. 3). В Табл. 1 приведены для сопоставления расчетные значения сопротивлений при различных исходных данных, найденные с помощью модели ELCUT и приведенные в работе [15]. Расхождение между результатами не превышает 5%.

Аналогичные результаты были получены и при моделировании заземлителя, выполненного на основе железобетонного грибовидного подножника башенной опоры, рассмотренного в работе [16]. Было исследовано сопротивление заземлителя в двухслойном грунте в зависимости от отношения удельных сопротивлений слоев ρ_1/ρ_2 при изменении положения границы раздела. Характер полученных зависимостей полностью соответствует результатам [16].

Таблица 1. Расчетные значения сопротивлений при частоте 50 Гц**Table 1.** Calculated resistance values at a frequency of 50 Hz

Удельное сопротивление бетона	Удельное сопротивление грунта			
	100	500	100	500
	Расчетные сопротивления заземлителя			
	По модели [15]		По модели ELCUT	
10	68,27	336,72	65,13	331,21
50	72,35	341,36	70,18	336,76

**Рис. 3.** Структура фундамента опоры из работы [15]**Fig. 3.** The structure of the support foundation from [15]

Таким образом, разработанная модель доказала свою применимость и для неоднородных грунтов.

Влияние температуры и влажности однослойного грунта на сопротивление заземлителя. В данном исследовании использована связанная модель ELCUT, включающая в себя модули растекания токов (2) и нестационарной теплопередачи (3) совместно с соответствующими граничными условиями. Задача была решена для однослойного грунта с нелинейными свойствами, вызванными влиянием температуры. В качестве внешнего воздействия рассматривалось синусоидальное напряжение промышленной частоты, позволяющее при определенных временных параметрах оценить влияние температуры.

При проведении расчетов в модуле растекания токов следует указать необходимость учета зависимости электропроводности от температуры и ввести зависимость $\gamma(T)$ посредством таблицы. Табличное представление является удобным, так как позволяет использовать экспериментальные данные без какой-либо дополнительной обработки в виде аналитической аппроксимации.

Поскольку наибольшие трудности возникают при сооружении заземлителей в песчаных грунтах, расчеты были проведены с ориентиром на диапазон удельных сопротивлений 100–1500 Ом·м, характерных для данного типа почв [12].

Результаты моделирования показали, что для большинства рассмотренных грунтов даже 30%-го содержания влаги оказывается достаточно для выхода на нижние предельные значения удельных сопротивлений. В частности, для песчаного грунта повышение влажности с 5% до 30% привело к уменьшению удельного сопротивления с 1500 Ом·м до 65 Ом·м.

Следует отметить, что с увеличением влажности грунта возрастает значение его относительной диэлектрической проницаемости, что также может быть учтено в рамках описанной модели.

Разработанная модель позволяет рассчитать значения сопротивления ЗУ для различных видов грунтов с учетом влияния влажности и температуры, что, в свою очередь, позволяет выбрать схемы грозозащиты энергосистемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заземление опор линий электропередач оказывает значительное влияние на формирование схем молниезащиты высоковольтных объектов. При этом сопротивление растеканию тока, связанное с удельным сопротивлением грунта, играет решающую роль. На величину сопротивления грунта существенное влияние оказывают его структура, влажность и температура.

Разработанная модель позволяет учесть все влияющие на удельное сопротивление грунта факторы и рассчитать значения сопротивления заземляющего устройства с их учетом.

Результаты моделирования получили подтверждение при сопоставлении с работами других авторов.

Использование для моделирования пакета ELCUT позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам

по сравнению с универсальными программными комплексами ANSYS и COMSOL MULTIPHYSICS.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куклин Д.В. Некоторые проблемы грозозащитных заземлений для объектов энергетики // Вестник Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 13. № 3. С. 7-12. doi: 10.37614/2307-5228.2021.13.3.001
2. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет числа грозовых отключений воздушной линии 110 кВ // Электричество. 2023. № 9. С. 22-30. doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-27-36
3. Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. EDN: QMLXYX
4. Гулов А.М., Колычев А.В. Модель опоры воздушной линии электропередачи в задачах молниезащиты // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 31-42. doi: 10.18721/JEST.29302
5. Куклин Д.В., Селиванов В.Н. Численный анализ влияния параметров опоры ЛЭП на уровень перенапряжений при прямом ударе молнии // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3 (22). С. 46-53. EDN: UXRZMH
6. Адамьян Ю.Э., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., и др. Влияние характеристик заземляющего устройства на эффективность работы нелинейных ограничителей перенапряжений // Электротехника. 2018. № 11. С. 73-78. EDN: KVRKX
7. Халилов Ф., Котляров Э. Вопросы молниезащиты ВЛ 35-150 кВ в районах крайнего севера // Электроэнергия. Передача и распределение. 2015. № 4 (31). С. 60-63. EDN: UGBABV
8. Боронин В.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., и др. Математическое моделирование заземляющих устройств при действии импульсных токов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 80-89. EDN: RPXHFR
9. Ивонин В.В., Данилин А.Н. Нелинейные процессы в грунтах при стекании импульсных токов с заземлителей // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 357-360. EDN: ZNHCPR
10. Вендин С.В., Соловьёв С.В., Килин С.В., Яковлев А.О. Моделирование и анализ молниезащиты при нештатной ситуации удара молнии на электрической подстанции // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68, N 3(44). С. 37-47. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-37-47

11. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С., Смирнов И.Н. Расчет заземлителей с учетом ионизации и частотных свойств грунта // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 6. С. 46-63. EDN: QRBLNH doi: 10.31857/S0002331022060024
12. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
13. Веденеева Л.М., Чудинов А.В. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 89-100. doi: 10.15593/2224-9923/2017.1.10
14. Кривошеев С.И., Колодкин И.С., Магазинов С.Г., и др. Моделирование волновых процессов в вертикальном заземлителе при грозovém воздействии // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 27-38. doi: 10.18721/JEST.27303
15. Лебедев В.Д. Компьютерное моделирование и исследование характеристик одиночных естественных заземлителей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 27-32. EDN: PFJWUN
16. Шишигин С.Л., Новикова А.Н. Расчет сопротивления заземления фундаментов опор ВЛ из железобетонных грибовидных подножников в неоднородном грунте // Известия НИИ постоянного тока. 2011. № 1 (65). С. 164-173. Дата обращения 30.04.2025. EDN: PAFZIL

REFERENCES

1. Kuklin DV. Some problems of lightning protection grounding for energy facilities. *Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;13(3):7-12. doi: 10.37614/2307-5228.2021.13.3.001
2. Shishigin SL, Shishigin DS, Smirnov IN. Calculation of the number of lightning outages of a 110 kV overhead line. *Electricity*. 2023;9:22-30. doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-27-36
3. Gumerova NI, Kolychev AV, Khalilov FK. Lightning protection of medium, high and ultra-high voltage electric networks (study guide). SPb: Publishing house of Polytechnic University; 2011. EDN: QMLXYX
4. Gulov AM, Kolychev AV. Model of overhead power line support in lightning protection problems. *Global energy*. 2023;29(3):31-42. doi: 10.18721/JEST.29302
5. Kuklin DV, Selivanov VN Numerical Analysis of the Influence of Power Transmission Line Support Parameters on the Overvoltage Level during a Direct Lightning Strike. *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;3(22):46-53. EDN: UXRZMH
6. Adamyan YuE, Bocharov YuN, Korovkin NV, et al. Influence of Grounding Device Characteristics on the Efficiency of Nonlinear Surge Arresters. *Electrical Engineering*. 2018;11:73-78. EDN: KVERYKX

7. Khalilov F, Kotlyarov E. Lightning protection issues for 35-150 kV overhead power lines in the far north. *Electric power. Transmission and distribution*. 2015;4(31):60-63. EDN: UGBABV
8. Boronin VN, Korovkin NV, Krivosheev SI, et al. Mathematical modeling of grounding devices under the action of pulsed currents. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*. 2013;6:80-89. EDN: RPXHFR
9. Ivonin VV, Danilin AN. Nonlinear processes in soils during pulse current flow from ground electrodes. *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*. 2017;14:357-360. EDN: ZNHCPR
10. Vendin SV, Soloviev SV, Kilin SV, Yakovlev AO. Modeling and analysis of lightning protection in case of an emergency lightning strike at an electrical substation. *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2021;68(3(44)):37-47. doi: 10.22314/2658-4859-2021-68-3-37-47
11. Shishigin SL, Shishigin DS, Smirnov IN. Calculation of grounding devices taking into account ionization and frequency properties of the soil. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2022;6:46-63. EDN: QRBLNH doi: 10.31857/S0002331022060024
12. Guide to protecting 6-1150 kV electrical networks from lightning and internal overvoltages. St. Petersburg: PEIPK Mintopenergo RF; 1999.
13. Vedeneva LM, Chudinov AV. Study of the influence of the main properties of soil on the resistance of grounding devices. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2017;16(1):89-100. doi: 10.15593/2224-9923/2017.1.10
14. Krivosheev SI, Kolodkin IS, Magazinov SG, et al. Modeling of wave processes in a vertical ground electrode under lightning influence. *Materials Science. Power Engineering*. 2021;27(3):27-38. doi: 10.18721/JEST.27303
15. Lebedev VD. Computer modeling and study of the characteristics of single natural ground electrodes. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2011;1:27-32. EDN: PFJWUN
16. Shishigin SL, Novikova AN. Calculation of grounding resistance of foundations of overhead power line supports made of reinforced concrete mushroom-shaped footings in heterogeneous soil. *Bulletin of the Research Institute of Direct Current*. 2011;1(65):164-173. EDN: PAFZIL

Сведения об авторе:

Карпова Ирина Михайловна, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753;
E-mail: legiero@mail.ru

Information about the author:

Irina M. Karpova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753;
E-mail: legiero@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681999>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© Д.Я. Монастырский, И.Г. Киселев

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ХОЛОДА СПГ В АВТОНОМНЫХ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

Цель. В статье рассматриваются технологические особенности утилизации холода сжиженного природного газа (СПГ) от топливной системы автономного рефрижераторного контейнера (рефконтейнера). Оценить эффективность использования холода от СПГ.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели проведена оценка холодильного потенциала от регазификации запаса СПГ и выполнен теплотехнический расчет холодильной установки.

Результаты. Описана каскадная холодильная установка с контурами СПГ и диоксидом углерода. Представлена оценка предполагаемого эффекта использования холода при регазификации СПГ в системе холодоснабжения рефрижератора.

Заключение. Полученные результаты позволяют оценить эффективность использования холодильного потенциала СПГ для транспортных рефрижераторных систем.

Ключевые слова: автономные энергоустановки; сжиженный природный газ; криогенное охлаждение; холодильный транспорт; утилизация холода; автономные рефрижераторные контейнеры.

Как цитировать:

Монастырский Д.Я., Киселев И.Г. Эффективность применения утилизации холода СПГ в автономных рефрижераторных контейнерах // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 246–260. doi: 10.17816/transsyst681999

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **D.Ya. Monastyrsky, I.G. Kiselev**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

EFFICIENCY OF LNG COLD ENERGY RECOVERY IN STANDALONE REFRIGERATED CONTAINERS

AIM. The paper discusses the process environment of liquefied natural gas (LNG) cold energy recovery from the fuel system of a standalone refrigerated container (reefer container). To evaluate the efficiency of LNG cold energy utilization.

MATERIALS AND METHODS. The authors determined the refrigeration potential of the LNG regasification process and a developed a thermal design of the refrigeration plant.

RESULTS. The paper describes a cascade refrigeration plant with LNG and carbon dioxide circuits. The authors assess the expected effect of cold energy utilization during LNG regasification in the refrigeration system of a refrigerator.

CONCLUSION. The results allow to assess the efficiency of LNG refrigeration potential utilization in refrigerator vehicles.

Keywords: standalone power plants; liquefied natural gas; cryogenic cooling; refrigerator vehicles; cold energy utilization; standalone refrigerated containers.

To cite this paper:

Monastyrsky DYa, Kiselev IG. Efficiency of LNG Cold Energy Recovery in Standalone Refrigerated Containers. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):246–260. doi: 10.17816/transsyst681999

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста объема грузовых железнодорожных перевозок и дефицита вагонного парка, для перевозки термолабильных грузов применяются рефрижераторные контейнеры (рефконтейнеры) со встроенной холодильной установкой [1–4]. С целью ускорения перевозок, широкое распространение получили автономные рефконтейнеры с навесным дизельным генератором и топливным баком. Энергетическая автономность рефконтейнера позволяет избежать формирования рефрижераторных цепов и обеспечивает сохранность груза при мультимодальных перевозках в ряде транспортных ситуаций, включая возможные простои из-за очередей в транспортных узлах или других нештатных логистических ситуациях.

Применение дизельных генераторов снижает привлекательность автономных рефрижераторных контейнеров из-за чувствительности топлива к низким температурам и негативного воздействия на окружающую среду, а также в контексте стабильного роста цен на дизельное топливо [5–6]. Напротив, низкие цены на природный газ привели к росту популярности сжиженного природного газа (СПГ) среди мировых логистических компаний. Мировая практика показывает, что экономическая целесообразность перехода с дизельного топлива на СПГ достигается, если стоимость сжиженного природного газа на 20% ниже стоимости дизельного топлива, независимо от затрат на техническое переоснащение [7]. По состоянию на конец 2024 года в Российской Федерации розничная цена СПГ составила около 20,0 руб./л, в то время как средняя розничная цена дизельного топлива достигла 68,0 руб./л, что обеспечивает экономическую целесообразность перехода с дизельного топлива на СПГ.

Эффективность энергетической установки СПГ дополнительно возрастет при условии утилизации низкопотенциальной энергии СПГ. Известные способы применения СПГ для охлаждения холодильных камер предполагают полное замещение рефрижераторных установок на традиционных фреонах, что приводит к нарушению принципов непрерывной холодильной цепи, исключает автономность рефрижератора и сужает диапазон доступных для перевозки грузов из-за трудностей с регулировкой температурного режима [8–12]. В данной работе описана комбинированная система холодоснабжения с оценкой ее эффективности.

СТРУКТУРА РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА С УТИЛИЗАЦИЕЙ ХОЛОДА СПГ

В основе утилизации холода СПГ для охлаждения груза в рефрижераторном контейнере лежит возможность отбора сжиженного газа из топливного контура. Регазификация СПГ осуществляется в спиральновитом теплообменном аппарате, предназначенном для эксплуатации в диапазоне криогенных температур.

В зависимости от состава СПГ, для полной регазификации перед подачей в газовый генератор потребуется до 925 кДж/кг [13]. Доступная для утилизации эксергия $e_{\text{спг}}$, Дж/кг, принята без учета механической эксергии из-за относительно небольшой разницы между начальным и конечным давлением СПГ, и определяется как изменение тепловой энергии с учетом необратимых потерь:

$$e_{\text{спг}} = h(T, p) - h_0(T_0, p_0) - T_0 [s(T, p) - s_0(T_0, p_0)] \quad (1)$$

Тепловая производительность теплообменного аппарата описывается с помощью уравнения теплового баланса [14, С. 65] с учетом мощности теплового потока, площади рабочей поверхности, температурного напора и характера течения рабочего тела:

$$Q_{\text{спг}} = G_{\text{спг}} \cdot (h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}) \quad (2)$$

$$h_{\text{вых}} = h_{\text{вх}} + L + c_p^r (T_r - T_{\text{нас}}) + \frac{R \cdot T_r}{I} \ln\left(\frac{P_{\text{спг}}}{P_{\text{газ}}}\right) \quad (3)$$

$$h_{\text{вх}} = c_p^{\text{ж}} (T_{\text{спг}} - T_{\text{газ}}) \quad (4)$$

где $Q_{\text{спг}}$ – производительность теплообменного аппарата, Вт; $G_{\text{спг}}$ – массовый расход СПГ, кг/с; $h_{\text{вх}}$ – энтальпия на выходе из теплообменника, Дж/кг; $h_{\text{вых}}$ – энтальпия на входе в теплообменник, Дж/кг; L – скрытая теплота испарения СПГ, Дж/кг; T_r – температура газа после регазификации, К; $T_{\text{нас}}$ – температура насыщения, К; $c_{\text{гр}}$ – удельная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К); $P_{\text{газ}}$ – давление газа на выходе, Па; $P_{\text{спг}}$ – давление жидкости на входе, Па; M – молярная масса газа, кг/моль; $c_p^{\text{ж}}$ – удельная теплоёмкость СПГ, Дж/(кг·К); R – универсальная газовая постоянная; $T_{\text{спг}}$ – температура хранения СПГ, К; $T_{\text{реф}}$ – референтная точка, К.

Рефрижераторная установка 40-футового рефконтейнера, в большинстве случаев, рассчитана на температурный диапазон

от -25°C до $+30^{\circ}\text{C}$ и обеспечивает холодопроизводительность до 5,0 кВт в зимний период и до 4,0 кВт в летний период, в качестве рабочего тела применяется фреон R-404a (реже R-134) [15]. Типовое устройство автономного рефрижераторного контейнера приведено на Рис. 1.

Для полного замещения фреонового контура 40-футового рефконтейнера, необходим постоянный расход СПГ не менее 9,7 кг/ч. Требуемый расход сопоставим с потреблением СПГ двигателем крупнотоннажного автомобильного транспорта. Расход топлива на газовый генератор рефрижераторного контейнера значительно ниже: максимальная мощность навесной энергоустановки не превышает 24,0 кВт, а усредненный расход СПГ при замещении дизельного топлива составит до 4,5 кг/ч. Расчетная холодопроизводительность при указанном расходе составит от 1,06 до 1,64 кВт.

Требуемый фактический запас дизельного топлива на рейс G_d , кг:

$$G_d = 1,1g \left[\tau_b + \nu_{x1}(\tau_r - \tau_b) + \nu_{x2}(\tau_{об} - \tau_r) \right] \quad (5)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий разогрев дизеля перед запуском; g – удельный расход дизельного топлива; τ_b – продолжительность первоначального охлаждения (нагрева) воздуха в рабочем пространстве рефрижераторного контейнера; τ_r – продолжительность охлаждения груза;

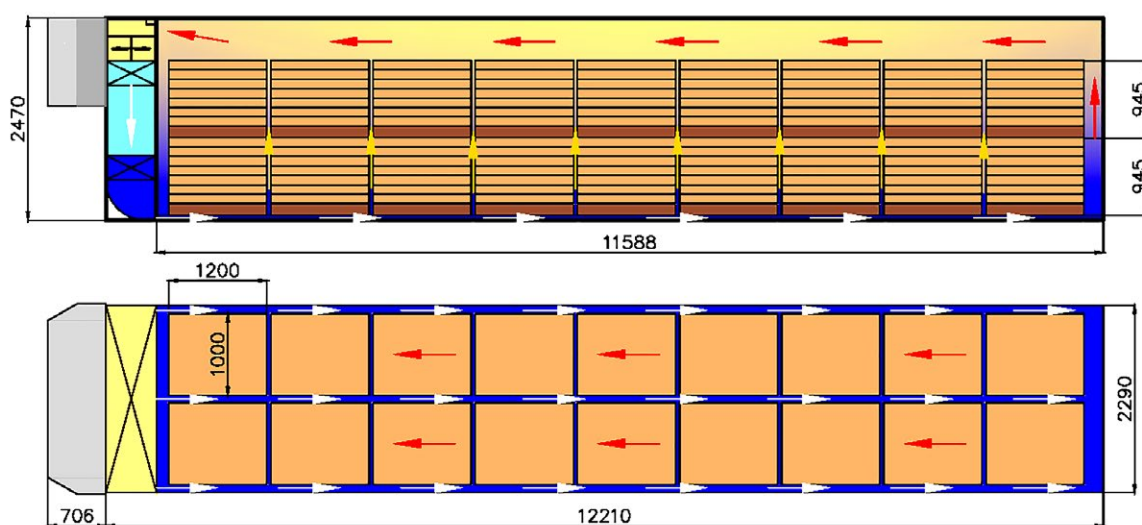


Рис. 1. Типовое устройство автономного рефрижераторного контейнера

Fig. 1. Typical design of an autonomous refrigerated container

$\tau_{об}$ – полное время рейса; $\nu_{x1(x2)}$ – коэффициент работы холодильного оборудования, определяемый как:

$$\nu_{x1(2)} = \frac{Q_{об}}{\left(1 - \frac{\Delta t_k}{\Delta t_m}\right) Q_x} \leq 1 \quad (6)$$

где $Q_{об}$ – мощность оборудования, Вт; Δt_k – расчётный тепловой напор через ограждающие конструкции рефконтейнера; Δt_m – максимальный температурный напор через ограждающие конструкции рефконтейнера, при котором прекращается полезная работа холодильных машин; Q_x – паспортная мощность холодильных машин.

Тогда требуемый фактический запас топлива на рейс $G_{спг}$, кг, и холодильный эксергетический потенциал $E_{спг}$, Дж:

$$G_{спг} = 1,79 G_d \quad (7)$$

$$E_{спг} = G_{спг} \cdot e_{спг} \quad (8)$$

где 1,79 – теоретический коэффициент перевода запаса дизельного топлива в СПГ, принятый как соотношения значений удельной теплоты сгорания СПГ и дизельного топлива с усредненными значениями плотности [16].

Наибольшая эффективность утилизации холода СПГ достигает в случае, если СПГ используется как единственное рабочее тело в цикле охлаждения [17]. Однако, из-за снижения теплопроводности металлов при низких температурах [18] и высокого температурного напора, обусловленного значительной разницей между температурой среды и СПГ, а также в целях повышения энергоэффективности процесса, для утилизации холода от СПГ в рабочем пространстве рефрижераторного контейнера предусмотрена установка дополнительной каскадной системы с диоксидом углерода (R744) в качестве рабочего тела (Рис. 2).

В первом контуре системы производится регазификация СПГ и нагрев топлива от -162°C до 5°C за счет тепловых притоков в спиральновитом теплообменном аппарате. Далее газ собирается в газовый коллектор, затем подается в топливную линию газового генератора. Второй контур нагревает СПГ за счет отвода теплоты от конденсатора диоксида углерода. Для контроля подачи СПГ в систему заложен трехходовой регулирующий клапан. С целью исключения процесса дросселирования

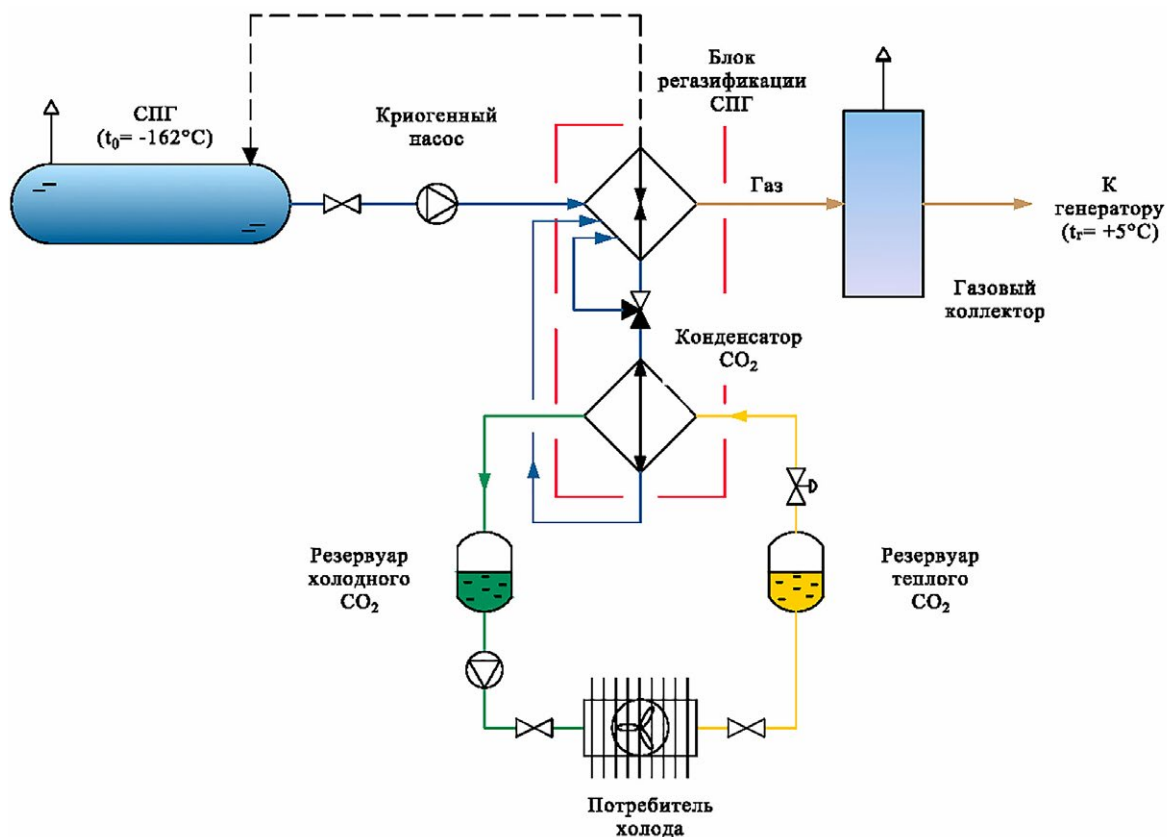


Рис. 2. Каскадная холодильная система для утилизации холода от СПГ

Fig. 2. Cascade refrigeration system for LNG cold energy utilization

жидкой фазы в регулирующем клапане, предполагается отбор СПГ температурой не ниже $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Требуемая холодильная нагрузка $Q_{\text{хол}}$ основной установки с фреоном должна компенсировать поступления теплоты $Q_{\text{общ}}$ в холодильную камеру контейнера [19]:

$$Q_{\text{хол}} = Q_{\text{общ}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{р}} \quad (9)$$

где $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{р}}$ – непрерывные, периодические и разовые теплопритоки в контейнер, соответственно, Вт.

$$Q_{\text{н}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (10)$$

$$Q_{\text{п}} = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad (11)$$

$$Q_{\text{р}} = Q_9 + Q_{10} \quad (12)$$

где Q_1 – теплоприток через ограждающие поверхности контейнера; Q_2 – приток наружного воздуха через неплотности; Q_3 – теплоприток, учитываемый в случае необходимости охлаждения груза в процессе перевозки; Q_4 – теплоприток от физиолого-биохимических процессов в плодоовощах; Q_5 – теплоприток из-за нагрева кузова от солнечной радиации; Q_6 – теплоприток от приточного свежего воздуха; Q_7 – теплоприток от электрооборудования; Q_8 – теплопоступление от испарителя при удалении снеговой шубы. Q_9 – теплоприток в случае открытия створок контейнера; Q_{10} – теплоприток при предварительном охлаждении контейнера.

При нормальных условиях эксплуатации, подобранная в соответствии с нормативными требованиями холодильная установка рефрижераторного контейнера компенсирует все указанные теплопоступления в объем холодильной камеры. Тем не менее, контейнерные перевозки широко используются в глобальных перевозках: смена транспорта и климатических поясов приводят к эксплуатации рефконтейнера в экстремальных условиях.

Тогда каскадная система охлаждения СПГ-СО₂, размещенная в фальшпотолке контейнера, позволит добиться компенсации поступлений теплоты от наиболее нагруженных поверхностей вследствие воздействия солнечной радиации, от биохимических тепловыделений плодоовощей и позволит значительно ускорить подготовку рабочего объема рефконтейнера перед загрузкой продуктов и ускорить охлаждение груза, если таковое требуется.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ХОЛОДА СПГ

Для оценки эффективности описанной каскадной системы охлаждения на основе утилизации холода от СПГ необходимо оценить работу встроенной холодильной установки рефконтейнера в контексте скорости подготовки рефконтейнера к загрузке и охлаждения груза в процессе ожидания отправки и/или транспортировки.

Связь мощности холодильных установок и скорости охлаждения груза в рабочем объеме рефконтейнера принимается в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{\text{реф}}}{G_{\text{гр}} \cdot C_{\text{гр}} + G_{\text{т}} \cdot C_{\text{т}}} \cdot k_{\text{т}} \quad (13)$$

где $Q_{\text{реф}}$ – полная холодильная мощность рефконтейнера, Вт; $G_{\text{гр}}$, $G_{\text{т}}$ – масса груза и тары соответственно, кг; $c_{\text{гр}}$, $c_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость груза и тары соответственно; $k_{\text{т}}$ – коэффициент, характеризующий отношение реального потока теплоты от груза к максимальному тепловому потоку при отсутствии термического сопротивления груза:

$$k_{\text{т}} = \frac{\lambda \cdot F}{\lambda \cdot F + b_{\text{г}} \cdot Q_{\text{уст}}} \quad (14)$$

где λ – теплопроводность груза, Вт/(м·К); F – площадь поверхности теплообмена, м²; $b_{\text{г}}$ – толщина слоя груза, м. Чем ниже теплопроводность, тем меньше эффект от увеличения мощности холодильной системы рефрижератора.

Для иллюстрации эффекта произведен расчет охлаждения рефконтейнера для перевозки красных помидоров. Параметры окружающей среды приняты для зимнего, переходного и летнего периодов г. Новороссийка, принятые в расчете параметры приведены в Табл. 1:

Паспортная холодильная мощность стандартного рефконтейнера принимается 3800 ккал/ч (4,42 кВт). Результаты сравнения эффективности охлаждения системой без СПГ и с СПГ приведены в Табл. 2.

Таблица 1. Условия перевозки красных помидоров

Table 1. Transportation conditions for red tomatoes

Категория	Параметр	Зимний период	Переходный период	Летний период
Условия	Температура среды	+7 °С	+15 °С	+30 °С
	Температура груза	+10 °С	+13 °С	+20 °С
Контейнер	Тип	40-футовый рефконтейнер		
	Загрузка	0,9 от максимальной		
	Рабочая температура	до -18 °С		
Груз	Наименование	Помидор красный		
	Масса объекта	0,02 кг		
	Целевая температура	+8 ...+1 °С		
Тара	Тип	Перфорированные ящики		
	Размеры	600×400×200 мм		
	Скважность	30 %		

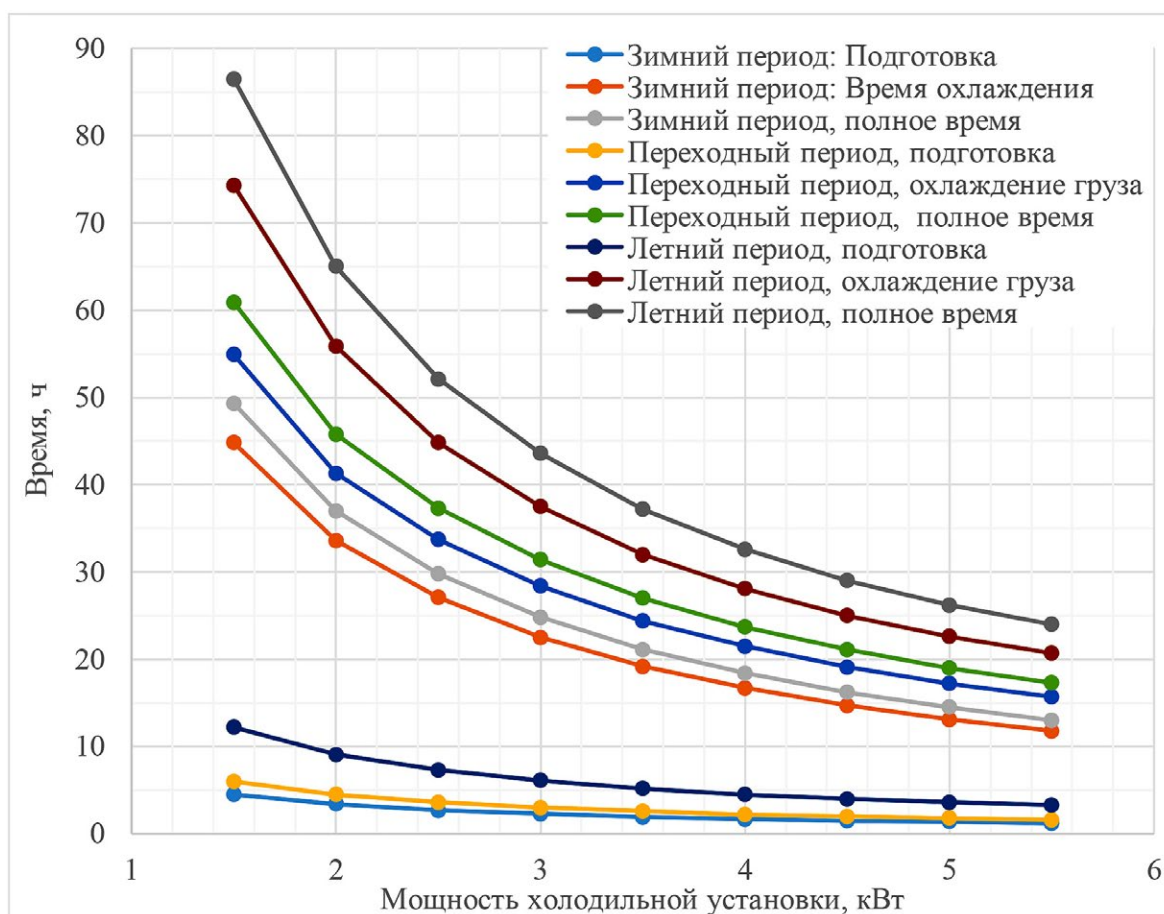


Рис. 3. Зависимость времени охлаждения пустого и загруженного рефконтейнера по сезонам (красные помидоры)

Fig. 3. Cooling time dependence of empty and loaded refrigerated containers by season (red tomatoes)

Таблица 2. Влияние утилизации холода СПГ на время подготовки и охлаждения груза
Table 2. Effect of LNG cold energy utilization on cargo preparation and cooling time

Период	Полное расчетное время	Доп. мощность СПГ	Итоговое время	Сокращение времени
Зимний	43 ч 48 мин	1,06 кВт	35 ч 24 мин	-19,18%
		1,64 кВт	32 ч 00 мин	-26,95%
Переходный	52 ч 30 мин	1,06 кВт	42 ч 24 мин	-19,24%
		1,64 кВт	38 ч 30 мин	-26,67%
Летний	68 ч 54 мин	1,06 кВт	55 ч 24 мин	-19,62%
		1,64 кВт	50 ч 18 мин	-26,98%

Результаты расчета подтверждают, что использование системы утилизации холода СПГ позволяет значительно сократить время, необходимое для охлаждения рабочего пространства рефконтейнера и перевозимого груза. Наибольший эффект наблюдается в летний период, обеспечивая сокращение подготовки рефконтейнера и охлаждения перевозимого груза до 27% в зависимости от холодопроизводительности системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен способ утилизации низкопотенциальной энергии сжиженного природного газа для охлаждения автономного рефрижераторного контейнера и дана оценка его эффективности.

В соответствии с международным опытом [7], при условии разницы в розничной цене на СПГ и дизельное топливо не менее 20%, применение СПГ сохраняет экономическую целесообразность; окупаемость достигается в срок до 1,5 лет при учете сохранения правительственных мер по защите климата.

- Разработана и приведена функциональная схема каскадной холодильной установки с отводом холода СПГ в контур с диоксидом углерода.
- Расчетное уменьшение полного времени охлаждения внутреннего объема рефконтейнера и груза составляет до 27% в летний период.
- Ожидаемый результат внедрения утилизации холода заключается в значительном снижении времени на подготовку рабочего пространства рефконтейнера и охлаждении груза, что обеспечит меньшую загрузку транспортных узлов.
- В случае задержки транспортировки груза, утилизация холода от СПГ позволит снизить нагрузку на основную установку и улучшить контроль за температурным режимом в различных климатических условиях, обеспечивая сохранность грузов при длительных перевозках.

Исходя из вышеизложенного, эффективности предлагаемых мер по утилизации низкопотенциальной энергии СПГ для повышения холодильной мощности автономных рефрижераторных контейнеров достаточно для осуществления мероприятий, связанных с внедрением утилизации. Результаты исследования предназначены для внедрения в транспортные системы, что окажет положительное влияние на развитие экологически чистой и экономически эффективной логистики.

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. Покровская О.Д. Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. Вып. 3. С. 58-72. EDN: QTHKZC doi: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72
2. Зоидов К.Х., Медков А.А., Зоидов З.К. Проблемы и перспективы меридиональной трансформации транспортно-транзитной системы России с использованием традиционных маршрутов международного транспортного коридора «Север–Юг» // Региональные проблемы преобразования экономики. 2023. № 12. С. 125-142. EDN: BLTQYL doi: 10.26726/1812-7096-2023-12-125-142
3. Ван Х., Коровяковский Е.К. Состояние и анализ развития железнодорожных рефрижераторных контейнеров // Научный аспект. 2023. Т. 27, № 11. С. 3373-3380. EDN PIKXDO
4. Момот В. Перевозки СПГ на дальние и средние расстояния: проблемы и решения // Рыбная сфера. 2016. № 1(15). С. 26-27. EDN: YZLOBT
5. Li D.C., Yang H.L., Xing Y.W. Economic and emission assessment of LNG-fuelled ships for inland waterway transportation // Ocean & Coastal Management. 2023. Vol. 246. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106906
6. Hoffelner M., Kopeinig J., Schieler P. The future of freight: Evaluating the environmental and economic benefits of diesel, LNG, and electric trucks in multimodal transport // Research in Transportation Business & Management. 2025. Т. 59. doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101319
7. LNG-fuelled trucking accelerates in Asia, denting diesel demand. Дата обращения: 06.05.2025. Режим доступа: <https://www.reuters.com/business/energy/lng-fuelled-trucking-accelerates-asia-denting-diesel-demand-2024-10-23/>
8. Tan H.; Li Y.; Tuo H. Theoretical and Experimental Study on a Self-Refrigerating System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2014. Vol. 20. P. 192-199. doi: 10.1016/j.jngse.2014.06.022
9. Jeong S.J., Park S.S., Min H.K., Jo G.Y. A Study of Development of Refrigerated Truck Small Scale Cooling System and Key-Part using Natural Refrigerants // Journal of the Korean Institute of Gas. 2019. Vol. 23, N. 1. P. 19-26. doi: 10.7842/kigas.2019.23.1.19
10. Wang F., Li M., Zhang Y., et al. Study on Roof-Mounted Radiant Cooling System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles // Int. J. Low-Carbon Technol. 2021. Vol. 16. P. 268-274. doi: 10.1093/ijlct/ctaa062

11. Saeed M.Z., Hafner A., Gabriell C., et al. CO₂ refrigeration system design and optimization for LNG driven cruise ships. In: 9th Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies Ohrid, R. Macedonia September 16-17, 2021 Proceedings. IIR, 2021. doi: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0015
12. Korlak P., Złoczowska E., Behrendt C. Utilization of waste heat and cold on the example of an LNG-fueled ultra-large container ship // *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 3488-3503. doi: 10.1016/j.egy.2024.09.026
13. Киселев И.Г., Комиссаров С.Б., Монастырский Д.Я. Оптимизация перевозок термочувствительных грузов в рефрижераторных контейнерах с применением альтернативных источников энергии // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2024. Т. 21, № 1. С. 229-237. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237
14. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок. Л.: Машиностроение, 1986.
15. Доссат Р.Д., Хоран Т.Дж. Основы холодильной техники. Москва: Техносфера, 2008.
16. Ворон О.А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)*. 2019. № 3 (78). С. 188-192. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192
17. Благин Е.В., Паньшин Р.А., Угланов Д.А. Сравнительный анализ различных установок, использующих низкопотенциальное тепло сжиженного природного газа. В кн.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 12–14 сентября 2018 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2018. С. 121-122. EDN YQTHWN
18. Заварицкий Н.В., Зельдович А.Г. Теплопроводность технических материалов при низких температурах // *Журнал технической физики*. 1956. Т. 26, №. 9. С. 2032-2036.
19. Ефимов В.В., Кобозева Н.Г., Конограй О.А., Слободчиков Н.А. Железнодорожный хладотранспорт и доставка скоропортящихся грузов: учебник. Екатеринбург: УМЦ ЖДТ, 2022.

REFERENCES

1. Pokrovskaya OD. Development of Russia's Logistics Transport System Under Sanctions. *Bulletin of scientific research results*. 2023;(3):58-72. (In Russ.) EDN: QTHKZC doi: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72
2. Zoidov KKh, Medkov AA, Zoidov ZK. Problems and prospects of meridional transformation the transport and transit system of Russia using traditional international transport routes the North–South corridor. *Regionalnye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2023;12:125-142. doi: 10.26726/1812-7096-2023-12-125-142

3. Van Kh, Korovyakovskii EK. *Sostoyanie i analiz razvitiya zheleznodorozhnykh refrizheratornykh konteynerov. Nauchnyi aspekt.* 2023;27(11):3373-3380. (In Russ.) EDN: PIKXDO
4. Momot V. LNG transportation over long and medium distances: problems and solutions. *Fish sphere.* 2016;(1):26-27. EDN: YZLOBT (In Russ.)
5. Li DC, Yang HL, Xing YW. Economic and emission assessment of LNG-fuelled ships for inland waterway transportation. *Ocean & Coastal Management.* 2023;(246). doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106906
6. Hoffelner M, Kopeinig J, Schieler P. The future of freight: Evaluating the environmental and economic benefits of diesel, LNG, and electric trucks in multimodal transport. *Research in Transportation Business & Management.* 2025;(59). doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101319
7. LNG-fuelled trucking accelerates in Asia, denting diesel demand. Accessed: 06.05.2025. Available from: <https://www.reuters.com/business/energy/lng-fuelled-trucking-accelerates-asia-denting-diesel-demand-2024-10-23>
8. Tan H, Li Y, Tuo H. Theoretical and Experimental Study on a Self-Refrigerating System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2014;(20):192-199. doi: 10.1016/j.jngse.2014.06.022
9. Jeong, SJ, Park SS, Min HK, Jo GY. A Study of Development of Refrigerated Truck Small Scale Cooling System and Key-Part using Natural Refrigerants. *Journal of the Korean Institute of Gas.* 2019;(23):19-26. doi: 10.7842/kigas.2019.23.1.19
10. Wang F, Li M, Zhang Y, et al. Study on Roof-Mounted Radiant Cooling System for LNG-Fueled Refrigerated Vehicles. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 2021;(16):268-274. doi: 10.1093/ijlct/ctaa062
11. Saeed MZ, Hafner A, Gabrielii C, et al. CO2 refrigeration system design and optimization for LNG driven cruise ships. In: *Proceedings of the 9th Conference on Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies Ohrid, R. 2021 Sept 16-17.* Macedonia: IIR; 2021. doi: 10.18462/iir.nh3-co2.2021.0015
12. Korlak P, Złoczowska E, Behrendt C. Utilization of waste heat and cold on the example of an LNG-fueled ultra-large container ship. *Energy Reports.* 2024;(12):3488-3503. doi: 10.1016/j.egyr.2024.09.026
13. Kiselev IG, Komissarov SB, Monastyrsky DYa. Alternative energy sources for transporting thermosensitive goods in autonomous refrigerated containers. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2024;(21):229-237. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-229-237
14. Danilova GN, Bogdanov SN, Ivanov OP, et al. *Teploobmennye apparaty kholodilnykh ustanovok.* Leningrad: Mashinostroenie; 1986. (In Russ.)
15. Dossat RJ. *Principles of Refrigeration.* New York and London: John Wiley & Sons Inc.; 1961.
16. Voron OA. The use of liquefied natural gas in the combined power unit of autonomous refrigerated car. *Vestnik of the Railway Research Institute.* 2019;(1):29-32. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192
17. Blagin EV, Panshin RA, Uglov DA. Comparative analysis of different plants utilizing cold energy of liquid natural gas. In: *Proceedings of the International Scientific*

- and Practical Conference: "Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya"; 2018 Sept 12–14, Samara, RU. Samara National Research University; 2018:121-122. EDN: YQTHWH*
18. Zavaritskii NV, Zel'dovich AG. Teploprovodnost' tekhnicheskikh materialov pri nizkikh temperaturakh. *Journal of Technical Physics*. 1956;(26):2032-2036. (In Russ.)
 19. Efimov VV, Kobozeva NG., Kongorai OA, Slobodchikov NA. Zheleznodorozhnyi khladotransport i dostavka skoroportyashchikhsya грузов. Yekaterinburg: UMTS ZhDT; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Монастырский Дмитрий Ярославович, аспирант;

eLibrary SPIN: 1010-3575; ORCID: 0009-0009-3528-8490;

E-mail: swen_88@mail.ru

Киселев Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 7398-3334; ORCID: 0000-0002-0862-9669;

E-mail: tatkiselev4.igor@yandex.ru

Information about the authors:

Dmitry Ya. Monastirsky, post-graduate student;

eLibrary SPIN: 1010-3575; ORCID: 0009-0009-3528-8490;

E-mail: swen_88@mail.ru

Igor G. Kiselev, Dr. Sci. (Engineering), professor;

eLibrary SPIN: 7398-3334; ORCID: 0000-0002-0862-9669;

E-mail: tatkiselev4.igor@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst682000>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© Е.Г. Серeda¹, А.С. Соловьев^{2, 3}

¹ ООО «Рэкфорк»

² Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

³ АО «Силовые машины»
(Санкт-Петербург, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Обоснование. Методы машинного обучения представляют собой современное и эффективное средство обеспечения функционирования различных технических систем, в том числе систем диагностирования. По мере накопления статистических данных о неисправностях диагностические системы, построенные на алгоритмах машинного обучения, обеспечивают более высокую точность прогнозирования и при этом не требуют дорогостоящего диагностического оборудования и высокой квалификации персонала.

Цель. Разработка диагностической системы, способной не только определять наличие неисправности, но и с высокой точностью оценивать степень ее развития.

Материалы и методы. Объектом исследования является трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; для достижения поставленной цели используются методы машинного обучения.

Результаты. На примере межвиткового короткого замыкания в обмотке статора показана возможность определения неисправности и степени ее развития даже на начальном этапе (при малом числе короткозамкнутых витков) с точностью не менее 95%.

Заключение. Методы машинного обучения позволяют создавать эффективные и недорогие диагностические системы, отличающиеся универсальностью, высокой точностью и не требующие высококвалифицированного персонала.

Ключевые слова: диагностика; машинное обучение; асинхронный двигатель; межвитковое замыкание обмотки.

Как цитировать:

Серeda Е.Г., Соловьев А.С. Определение неисправностей асинхронных двигателей с помощью алгоритмов машинного обучения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 261–272. doi: 10.17816/transsyst682000

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© E.G. Sereda¹, A.S. Solovyov^{2, 3}¹ LLC “RackFork”² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University³ JSC “Power machines”

(St. Petersburg, Russia)

ASYNCHRONOUS MOTOR FAULT DETECTION USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

BACKGROUND. Machine learning methods are effective advanced means ensuring the operability of various engineering systems, including test systems. As statistics on faults accumulate, test systems based on machine learning algorithms provide higher prediction accuracy and do not require expensive test equipment and skilled personnel.

AIM. To develop a test system capable of both determining the fault and assessing its extent with high accuracy.

MATERIALS AND METHODS. The subject of the study is a three-phase asynchronous motor with a squirrel cage rotor; machine learning methods are used to achieve the goal.

RESULTS. Using the example of interturn faults in the stator winding, the authors demonstrate that it is possible to detect the fault and its extent even at the initial stage (with a few short-circuited turns) with an accuracy of at least 95%.

CONCLUSION. Machine learning methods allow to develop effective and affordable test systems that are versatile, highly accurate, and do not require skilled personnel.

Keywords: testing; machine learning; asynchronous motor; interturn winding fault.

To cite this paper:

Sereda EG, Solovyov AS. Asynchronous Motor Fault Detection Using Machine Learning Algorithms. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):261–272. doi: 10.17816/transsyst682000

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели получили широкое распространение в электроприводе транспортных средств и технологических механизмов предприятий промышленности и транспорта благодаря простоте конструкции, надежности в эксплуатации и ремонтпригодности. По данным статистики асинхронные двигатели потребляют до 80% электрической энергии в промышленности и до 30% на транспорте. Несмотря на высокую надежность, асинхронные двигатели подвержены отказам, наиболее частыми причинами которых являются эксплуатационные перегрузки (около 50% случаев) и технологические нарушения (около 35% случаев). Для асинхронных двигателей общепромышленного исполнения мощностью 5 кВт и выше около 85% отказов происходят из-за повреждения обмоток статора, при этом свыше 90% от этого числа составляют межвитковые замыкания. Для асинхронных двигателей, работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации, связанных с тепловыми, вибрационными и ударными механическими нагрузками, в частности тяговых двигателей, распределение отказов по элементам конструкции может отличаться от приведенных значений в сторону увеличения процента отказов подшипниковых узлов и обрыва стержней ротора [1–4].

Контроль технического состояния и диагностирование неисправностей являются важным элементом правильной эксплуатации электрических машин и эффективным инструментом предупреждения отказов, вызывающих нарушение технологического процесса. В настоящее время известно множество методов диагностирования неисправностей электрических машин, однако большинство из них связано с необходимостью остановки двигателя и технологического механизма. Кроме того, многие методы для правильной интерпретации результатов диагностики требуют участия высоко квалифицированного персонала [5–9]. По этим причинам в последнее время возрастает интерес к системам диагностирования, основанным на методах машинного обучения при минимальном участии обслуживающего персонала и минимальной потребности в измерительном оборудовании [10, 11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В настоящей работе рассматривается следующая задача: для асинхронного трехфазного двигателя на основе методов машинного

обучения создать систему диагностирования, способную малыми измерительными средствами с достаточной точностью определять не только наличие неисправности, но и степень ее развития. В качестве неисправности, идентификация которой осуществляется методами машинного обучения, выступает наиболее распространенная причина отказов асинхронных двигателей – межвитковое короткое замыкание обмотки статора.

Модель машинного обучения, способная анализировать и диагностировать неисправности асинхронных двигателей, создана на базе экспериментального стенда, схема которого представлена на Рис. 1. Две фазы асинхронного двигателя АД питаются от преобразователя частоты ПЧ через автотрансформатор АТ, третья фаза АД питается от ПЧ напрямую. Таким образом удастся имитировать межвитковое короткое замыкание в третьей фазе двигателя. Путем изменения положения подвижного контакта АТ можно также имитировать межвитковое короткое замыкание различного количества витков в фазе обмотки статора АД. Два датчика тока ДТ передают сигнал на измерительное устройство ИУ, связанное с персональным компьютером ПК. Нагрузка АД обеспечивается

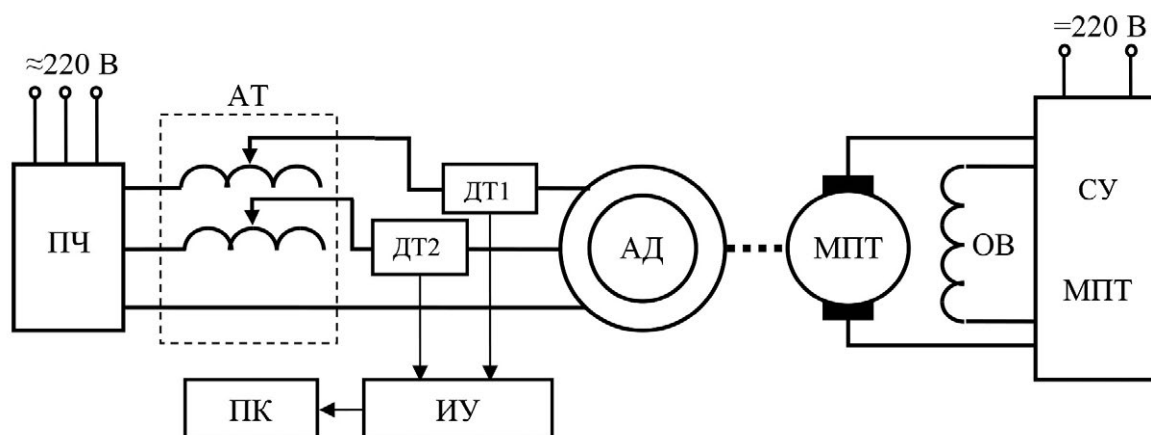


Рис. 1. Экспериментальный стенд

ПЧ – преобразователь частоты; АТ – автотрансформатор; ДТ1, ДТ2 – датчики тока;
АД – асинхронный двигатель; МПТ – машина постоянного тока; ОВ – обмотка независимого возбуждения МПТ; СУ МПТ – система управления МПТ;
ИУ – измерительное устройство; ПК – персональный компьютер.

Fig. 1. Experimental setup

ПЧ – frequency converter; АТ – autotransformer; ДТ1, ДТ2 – current sensors;
АД – asynchronous motor; МПТ – direct current machine; ОВ – independent excitation winding of МПТ; СУ МПТ – control system of МПТ; ИУ – measuring device;
ПК – personal computer.

машиной постоянного тока МПТ независимого возбуждения, создающей противодействующий момент на валу двигателя АД. В Табл. 1 представлен объем собранных экспериментальных данных для различного количества короткозамкнутых витков фазы обмотки статора АД. Исходный сигнал, получаемый от датчиков тока ДТ, представлен на Рис. 2.

Корректное применение алгоритмов машинного обучения возможно лишь после обработки (фильтрации) сигналов, получаемых от датчиков тока ДТ. Такая фильтрация сигналов, содержащих высокочастотные помехи, осуществлена с помощью фильтра на базе операционного усилителя LM252 и алгоритмически на основе скользящего среднего (Рис. 3). Обработанные, без помех сигналы датчиков ДТ1 и ДТ2 далее были нормализованы и приведены к одинаковой размерности с числом периодов $N=4$.

Таблица 1. Объем собранных экспериментальных данных для обучения модели

Table 1. Volume of collected experimental data for model training

Наличие межвиткового короткого замыкания	Количество измерений
Без межвиткового короткого замыкания	142
Межвитковое короткое замыкание, 5 % числа витков	85
Межвитковое короткое замыкание, 10 % числа витков	80
Межвитковое короткое замыкание, 15 % числа витков	90

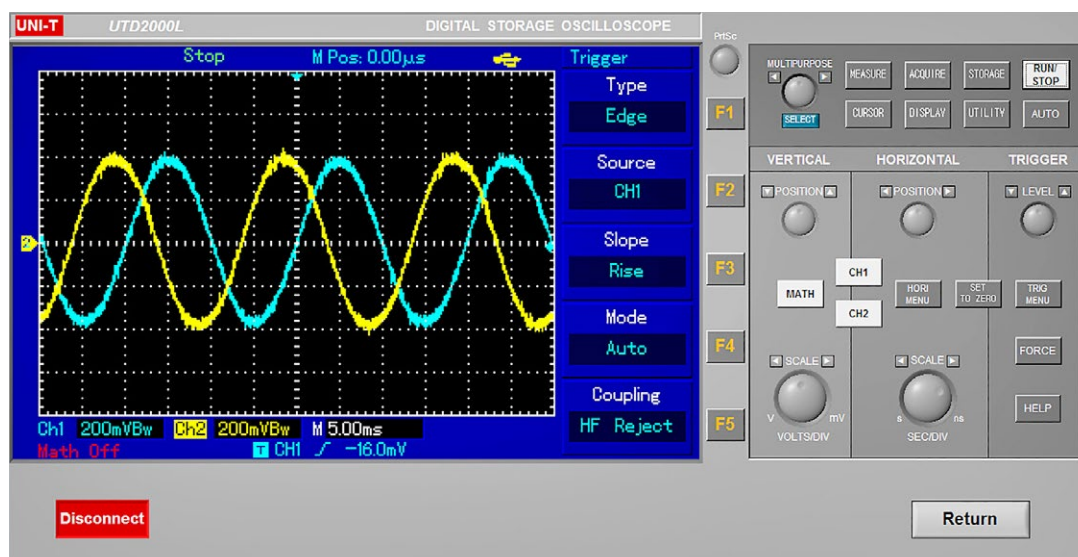


Рис. 2. Исходный сигнал, получаемый от датчиков тока ДТ

Fig. 2. Initial signal received from the DT current sensors

На Рис. 4 представлены обработанные и нормализованные сигналы датчиков тока для двух различных степеней развития межвиткового короткого замыкания в фазе обмотки статора АД. Видно, что сигналы для этих случаев визуально практически неотличимы, что делает применение стандартных методов диагностирования малоэффективным и приводит к необходимости использовать методы машинного обучения, позволяющие с достаточной точностью определить, как вид неисправности, так и степень ее развития [12].

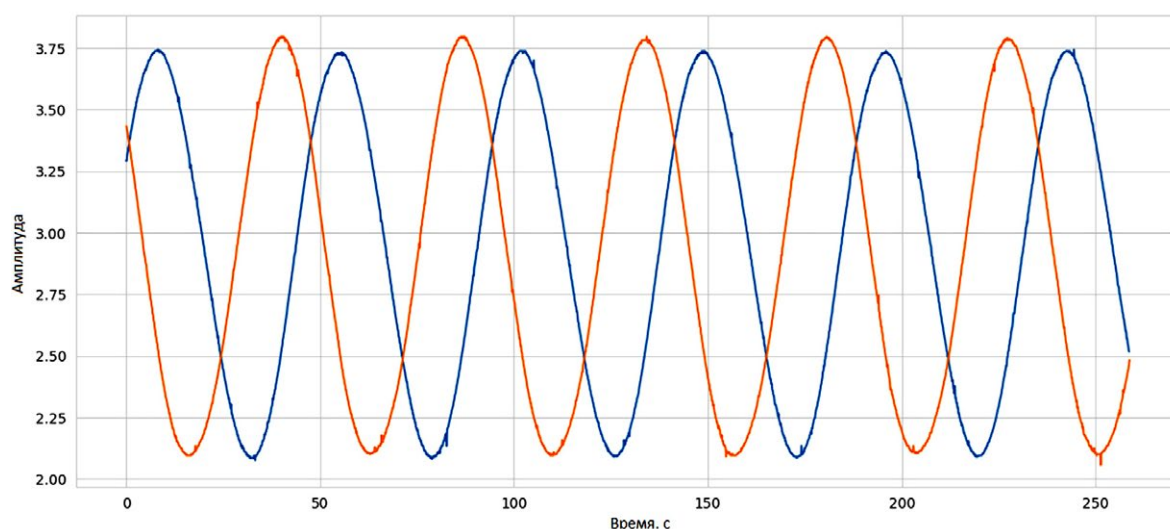


Рис. 3. Сигнал датчиков тока ДТ1, ДТ2 после фильтрации высокочастотных помех

Fig. 3. Signal from current sensors after filtering high-frequency interference

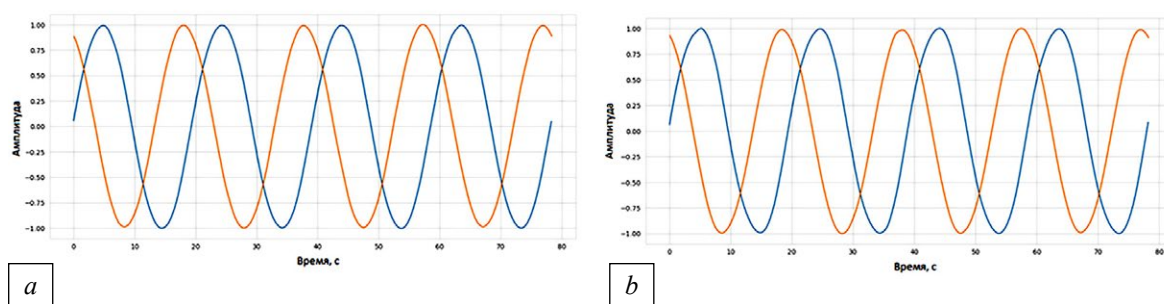


Рис. 4. Вид нормализованных сигналов датчиков тока после фильтрации для различной степени развития межвиткового короткого замыкания:
a – короткое замыкание 5% витков; *b* – короткое замыкания 15% витков

Fig. 4. View of normalized signals from current sensors after filtering for different degrees of development of interturn short circuit:
a – short circuit of 5% of turns; *b* – short circuit of 15% of turns

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Рассмотрим несколько методов машинного обучения, которые могут быть использованы при решении поставленной задачи.

Метод случайного леса (Random Forest) представляет собой метод, используемый для решения задач классификации и регрессии, и основан на объединении множества деревьев решений для улучшения точности и устойчивости модели. Алгоритм метода заключается в создании множества деревьев решений и использовании их для поиска окончательного решения. Каждое из деревьев строится на случайном подмножестве обучающих данных и признаков, в результате чего деревья отличаются друг от друга, что позволяет уменьшить эффект переобучения и повысить качество предлагаемых решений. Этот метод обеспечивает высокую точность, устойчивость к переобучению за счет использования подвыборок и случайных признаков, характеризуется большей гибкостью в силу того, что может обрабатывать пропущенные данные, и позволяет определить, какие признаки оказывают наиболее сильное влияние на результат. К недостаткам метода можно отнести потребность в настройке сложных параметров и необходимость значительного времени для обучения модели, особенно при использовании большого количества деревьев решений [13].

Метод Extreme Gradient Boosting обеспечивает высокую точность и масштабируемость результатов. Модели, которые обычно представляют собой деревья решений, обучаются последовательно, при этом последующая модель исправляет ошибки предыдущих. Первым этапом алгоритма является обучение базовой модели, которая в задачах регрессии прогнозирует среднее значение целевой переменной, и вычисление ошибок между прогнозируемыми и фактическими значениями. Обучение следующего дерева осуществляется на ошибках предыдущего с исправлением этих ошибок, далее процесс повторяется до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий остановки. Преимуществами метода являются возможность параллельных вычислений, устойчивость к переобучению и выбросам, высокая точность, работа с пропущенными значениями, возможность обрабатывать новые данные. К недостаткам можно отнести трудоемкость вычислений, особенно при обучении сложных моделей, что затрудняет использование этого метода для систем с ограниченными ресурсами [14].

Метод логистической регрессии (Logistic Regression) используется для разделения данных на классы и моделирования вероятности отнесения

данных к одному из классов. Суть метода заключается в прогнозировании вероятности возникновения некоторого события на основе данных об уже случившихся событиях. В отличие от обычной регрессии метод не предполагает прогнозирования численного значения переменной, а определяет вероятность того, что исходное значение будет принадлежать к определенному классу. Преимущества метода заключается в простоте реализации и интерпретации данных, удобстве использования для начальных этапов анализа данных, способности к быстрому обучению, возможности интерпретировать коэффициенты модели как показатели важности признака. Недостатками являются невозможность решения нелинейных задач, чувствительность к шуму и выбросам (аномальные значения могут существенно повлиять на результат), при наличии сильно взаимосвязанных переменных коэффициенты могут стать нестабильными и сложно интерпретируемыми [15, 16]. Логистическая регрессия изначально предназначена для бинарной классификации, но её можно адаптировать для задач с несколькими классами (мультиклассовая классификация). Одним из подходов является: One-vs-Rest (OvR) / One-vs-All (OvA). Этот подход основан на том, что для каждого класса создаётся отдельная бинарная модель, которая предсказывает вероятность принадлежности к этому классу против всех остальных. На этапе предсказания выбирается класс с наибольшей вероятностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методы случайного леса, Extreme Gradient Boosting и логической регрессии использованы для решения поставленной задачи по определению наличия межвиткового замыкания в фазе обмотки статора АД и степени его развития. Сравнение точности указанных алгоритмов машинного обучения для решения задачи проводилось при помощи перекрестной проверки при разделении данных на десять частей. Результаты представлены в Табл. 2.

Таблица 2. Точность использованных методов машинного обучения

Table 2. Accuracy of the machine learning methods used

Алгоритм	Точность	Отклонение
Метод случайного леса (Random Forest)	0,931	0,079
Метод экстремального усиления градиента (EG Boosting)	0,937	0,054
Метод логической регрессии (Logistic Regression)	0,985	0,020

Для решения поставленной задачи наиболее точным оказался метод логистической регрессии (точность 98,5%). ROC кривые (Receiver Operating Characteristics), которые показывают насколько хорошо модель машинного обучения может различать два класса событий, а также матрица ошибок, показывающая количество правильных и ошибочных предсказаний для каждого класса при обучении модели на 60% собранных данных, представлены на Рис. 5.

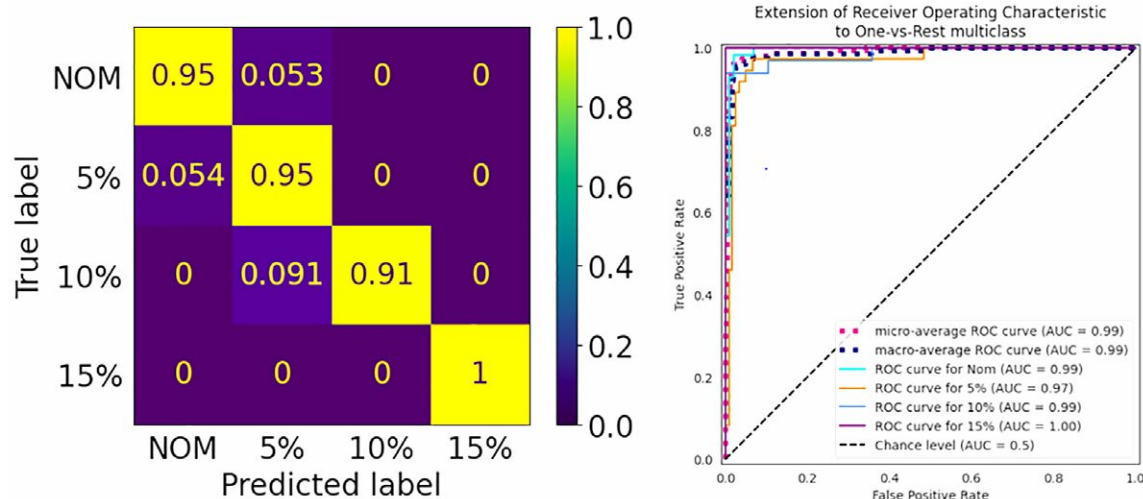


Рис. 5. Матрица ошибок (слева) и ROC кривая (справа)
для алгоритма логистической регрессии

Fig. 5. Error matrix (left) and ROC curve (right) for the logistical regression algorithm

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере межвиткового короткого замыкания обмотки статора асинхронного двигателя показано, что алгоритмы машинного обучения являются эффективным средством диагностики не только наличия неисправности, но и позволяют с достаточной точностью определять степень ее развития. Используемые в работе методы позволяют с высокой достоверностью определять наличие межвиткового короткого замыкания даже при весьма малом числе короткозамкнутых витков обмотки, что дает возможность диагностировать неисправность на начальном этапе ее развития и предупредить нарушение технологического процесса. Диагностика с помощью методов машинного обучения характеризуется низкой стоимостью измерительно-диагностического оборудования и не требует специальных навыков обслуживающего персонала. Методы

машинного обучения могут быть использованы для диагностики неисправностей различных элементов конструкции электрических машин; точность диагностирования будет при этом увеличиваться по мере накопления статистических данных.

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. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. М.: Академия, 2003.
2. Дорохина Е.С., Голдовская А.А., Гирник А.С. Прогнозирование остаточного ресурса асинхронных электродвигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 4. С. 63-67.
3. Воробьев В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин. СПб: СЗТУ, 2004.
4. Рыжова Е.Л., Ким К.К., Иванов С.Н. Оценка надежности тяговых двигателей на основе состояния электрической изоляции обмотки // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 5 (69). С. 8-14.
5. Мясоедова М.А., Мамонова Л.Г. Анализ современных методов диагностики электрооборудования. В кн.: Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса: сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 05 июня 2024 года. Курск: Университетская книга, 2024. С. 81-84.
6. Королева Е.Б., Курмашев С.М., Ким К.К., и др. Устройства экспресс-диагностирования силовых полупроводниковых приборов и полупроводниковых преобразователей // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 119-125.
7. Siddique A., Yadava G., Singh B. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, N. 1. P. 106-114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304
8. Villada F., Cadavid D., Munoz N., et al. Fault Diagnosis in Induction Motors Fed by PWM Inverters. In: 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED, 2003. P. 229-234. doi: 10.1109/DEMPED.2003.1234578
9. 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. EDN: GOMQNE doi: 10.17816/transsyst635142

10. Сальников С.В., Солодкий Е.М., Вишняков Д.Д., и др. Диагностика асинхронного двигателя на основе машинного обучения. В кн.: XXVI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2023). Сборник докладов. Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 г. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. С. 295-300. EDN: BXTXDQ
11. Хальясмаа А.И. Машинное обучение как инструмент повышения эффективности управления жизненным циклом высоковольтного электрооборудования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 246. № 5. С. 1093-1104.
12. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы 2015. №1 (26). С. 4-9.
13. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, N. 1. P. 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324
14. Chen T, Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: ACM, 2016. P. 785-794.
15. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015.
16. Кугаевских А.В., Муромцев Д.И., Кирсанова О.В. Классические методы машинного обучения. СПб: Университет ИТМО, 2022.

REFERENCES

1. Kotelents NF, Akimova NA, Antonov MV. *Ispytania, ekspluatatsia i remont elektricheskikh mashin*. Moscow: Akademia; 2003. (In Russ.)
2. Dorokhina ES, Goldovskaya AA, Girnik AS. A Way To Predict The Residual Lifetime Of Induction Traction Electric Motors. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019;48(4):336-339. (Russ., Engl.) doi: 10.1134/S0235711919040060
3. Vorobiev VE, Kucher VIa. *Prognozirovanie sroka sluzhby elektricheskikh mashin*. St.-Petersburg: SZTU, 2004. 56 p. (In Russ.).
4. Ryzhova EL, Kim KK, Ivanov SN. Evaluation of Traction Motor Reliability Based On The State Of Winding Electrical Insulation. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023; 5(69):8-14. (In Russ.). doi: 10.17084/20764359-2023-69-8
5. Miasoedova MA, Mamonova LG. Analiz sovremennykh metodov diagnostiki elektrooborudovania. In: *Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific and Practical Conference "Technologii, mashiny i oborudovanie dlya agropromyshlennogo kompleksa"*. 2024 June 5. Kursk: Universitetskaya Kniga. 2024:81-84. (In Russ.).
6. Koroleva EB, Kurmashev SM, Kim KK, Tkachuk AA, Kuznetsov AA. Devices for express diagnostics of power semiconductor devices and semiconductor converters. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023;2(186):119-125. (Russ., Engl.) doi: 10.25206/1813-8225-2023-186-119-125

7. Siddique A, Yadava G, Singh B. A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005;20(1):106-114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304
8. Villada F, Cadavid D, Munoz N, et al. Fault Diagnosis in Induction Motors Fed by PWM Inverters. In: *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003*. SDEMPED; 2003:229-234. doi: 10.1109/DEMPED.2003.1234578
9. 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/transsyst635142557
10. Salnikov SV, Solodkiy EM, Vishnyakov DD, et al. Diagnostika asinhronnogo dvigatelia na osnove mashinnogo obucheniya. In: *Proceedings of the XXVI International Conference on soft Computing and Measurements SCM-2023*. 2023 May 24-26. St. Petersburg: SPBGETU "LETI"; 2023.
11. Khalyasmaa A. Machine Learning as a Tool of High-Voltage Electrical Equipment Lifecycle Control Enhancement. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1093-1094. doi: 10.21285/1814-3520-2020-5-1093-1104.
12. Korobeinikov AB, Sarvarov AS. Analysis Of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of their Development. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2015;26(1):4-9. doi: 10.18503/2311-8318
13. Breiman L. *Random Forests*. *Machine Learning*. 2001;45(1):5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324
14. Chen T, Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco: ACM; 2016:785-794.
15. Flakh P. *Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov kotorye izvlekaut znaniya iz dannyh*. Moscow: DMK Press; 2015. (In Russ.).
16. Kugaevskiy AV, Muromtsev DI, Kirsanova OV. *Klassicheskie Metody Mashinnogo Obucheniya*. St.-Petersburg: Universitet ITMO; 2022. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Серёда Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, старший специалист;
eLibrary SPIN: 4284-3319;
E-mail: evgeniy.sereda@rackfork.ru

Соловьёв Андрей Сергеевич, аспирант, инженер по испытаниям;
eLibrary SPIN: 1594-5049; ORCID: 0009-0001-2408-1840;
E-mail: vgvhyjh@mail.ru

Information about the authors:

Evgeny G. Sereda, Cand. Sci. (Tech.), Senior specialist;
eLibrary SPIN: 4284-3319;
E-mail: evgeniy.sereda@rackfork.ru

Andrey S. Solovyov, Post graduate student, test engineer;
eLibrary SPIN: 1594-5049; ORCID: 0009-0001-2408-1840;
E-mail: vgvhyjh@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst682001>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© А.А. Ткачук

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

Цель. Определение условий проявления стабилизирующих свойств трехфазного трансформатора принципиально новой конструкции и определение величины отклонения выходного напряжения трансформатора при токовых перегрузках.

Материалы и методы. Выполнен электромагнитный расчет трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в программе ELCUT, проведен анализ процессов в трансформаторе с помощью схемы замещения его магнитной цепи.

Результаты. При изменении номинального значения тока вторичной обмотки на 20% выходное напряжение изменилось только на 0,14%.

Заключение. Назрела необходимость в комплексной оценке электродинамической и термической стойкости трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в переходных процессах.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор; стабилизирующие свойства; электромагнитный расчет; магнитный поток; магнитное насыщение; магнитная проницаемость; секционированные обмотки; токовые перегрузки.

Как цитировать:

Ткачук А.А. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами при токовых перегрузках // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 273–290. doi: 10.17816/transsyst682001

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **A.A. Tkachuk**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

THREE-PHASE TRANSFORMER WITH STABILIZING PROPERTIES AT OVERLOAD CURRENTS

AIM. To determine the conditions when a three-phase transformer of a fundamentally new design has stabilizing properties and the deviation of the transformer output voltage at overload currents.

MATERIALS AND METHODS. We developed an electromagnetic design of a three-phase transformer with stabilizing properties using ELCUT software and analyzed the processes occurring in the transformer using an equivalent magnetic circuit.

RESULTS. When the rated secondary current changed by 20%, the output voltage only changed by 0.14%.

CONCLUSION. There is a need for a comprehensive assessment of the electrodynamic stability and thermal resistance of a three-phase transformer with stabilizing properties in transient processes.

Keywords: three-phase transformer; stabilizing properties; electromagnetic design; magnetic flux; magnetic saturation; magnetic permeability; winding sections; overload currents.

To cite this paper:

Tkachuk AA. Three-Phase Transformer With Stabilizing Properties at Overload Currents. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):273–290. doi: 10.17816/transsyst682001

ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация выходного напряжения силового трансформатора позволяет обеспечить требуемое значение выпрямленного напряжения подстанции, в состав которой он входит и является одним из ключевых элементов инфраструктуры тягового электроснабжения [1–3].

Среди существующих способов регулирования выходного напряжения трансформатора, к которым можно отнести изменение числа витков его первичной обмотки, использование различных вольтодобавочных устройств в цепи вторичной обмотки, особое место занимает стабилизация напряжения с помощью управления магнитными потоками, протекающими в расщепленных стержнях трансформатора. Трехфазный трансформатор, работа которого основана на таком принципе регулирования напряжения вторичной обмотки, обладает особыми стабилизирующими свойствами, которые проявляются при определенных условиях, и выполняет функцию источника питания трансформаторно-выпрямительного агрегата тяговой подстанции не только в номинальном режиме ее работы, но также при резком увеличении выпрямленного тока.

Целью работы является определение условий проявления стабилизирующих свойств трансформатора, а также влияние токовых перегрузок на уровень напряжения вторичной обмотки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ магнитной цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами.
2. Численный расчет трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами.

В качестве инструментов исследования процессов, протекающих в трехфазном трансформаторе со стабилизирующими свойствами, использовались методы анализа магнитных и электрических цепей переменного тока. При расчете токов, напряжений и магнитных потоков трансформатора [4] также использовались элементы теории комплексного переменного и теории дифференциальных уравнений, а также численные методы расчета электромагнитного поля.

Средой для моделирования электромагнитных процессов, протекающих в основных элементах конструкции трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами, был выбран отечественный программный пакет ELCUT.

РАЗРАБОТКА ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

Конструкция трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами [5] также представлена на Рис. 1, где 1 – ярмо, 2 – расщепленный стержень, 3 и 4 – подстержни, 5 и 6 – секции первичной обмотки, 7 и 8 – секции вторичной обмотки, 9 – короткозамкнутая обмотка. Материалом магнитопровода трансформатора выбрана электротехническая сталь марки 1514.

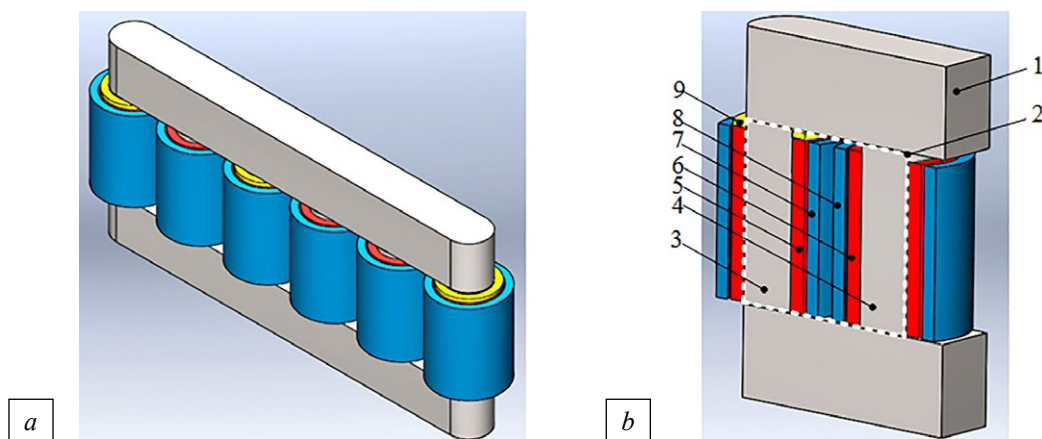


Рис. 1. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами:
а – общий вид, б – конструкция фазы «А» трансформатора

Fig. 1. Three-phase transformer with stabilizing properties:
а – general view, б – design of phase «A» of the transformer

На Рис. 2 представлены основные величины и элементы схемы замещения электрической цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами:

u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} – мгновенные значения линейных напряжений первичных обмоток трансформатора;

u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} – мгновенные значения линейных напряжений вторичных обмоток трансформатора;

i_A, i_B, i_C – мгновенные значения токов первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

i_{ak}, i_{bk}, i_{ck} – мгновенные значения токов короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{A1} и R_{A2} , R_{B1} и R_{B2} , R_{C1} и R_{C2} – активные сопротивления первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{A1} и L_{A2} , L_{B1} и L_{B2} , L_{C1} и L_{C2} – собственные индуктивности первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{a1} и R_{a2} , R_{b1} и R_{b2} , R_{c1} и R_{c2} – активные сопротивления первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{a1} и L_{a2} , L_{b1} и L_{b2} , L_{c1} и L_{c2} – собственные индуктивности первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

R_{ak} , R_{bk} , R_{ck} – активные сопротивления короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно;

L_{ak} , L_{bk} , L_{ck} – собственные индуктивности короткозамкнутых обмоток фаз «А», «В», «С» трансформатора соответственно.

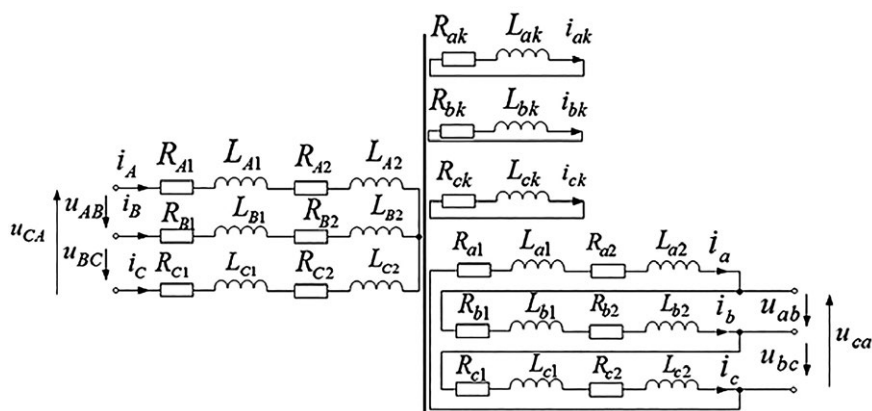


Рис. 2. Схема замещения электрической цепи трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами

Fig. 2. Equivalent circuit diagram of a three-phase transformer with stabilizing properties

При подключении к первичным обмоткам трансформатора переменных синусоидальных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , по линейным проводам первичных обмоток будет протекать синусоидальные токи i_A , i_B , i_C . Поскольку характеристика намагничивания $B(H)$ материала магнитопровода нелинейная [6], то магнитные потоки, протекающие по стержням, в своем составе помимо 1-ой гармонической составляющей будут содержать четные гармоники (3, 5, 7, 9, 11). В данном случае 5-й,

7-й, 9-й и 11-й составляющими можно пренебречь ввиду их малости. Гармонические составляющие магнитных потоков, кратные трем, будут наводить во вторичных обмотках трансформатора переменные электродвижущие силы, изменяющиеся с циклической частотой 3ω . Тогда в «треугольнике» вторичных обмоток гармонические составляющие токов i_a, i_b, i_c с циклической частотой 3ω будут создавать магнитные потоки этой же частоты и компенсировать магнитные потоки первичных обмоток.

Таким образом, основной магнитный поток каждой фазы трансформатора будет содержать в своем составе только первую гармоническую составляющую, следовательно, результирующие напряжения вторичных обмоток будут синусоидальными.

Дальнейшие исследования процессов в обмотках и магнитопроводе трансформатора проведем с использованием схемы замещения его магнитной цепи. Для ее расчета воспользуемся комплексным методом [7, 8]. Для этого несинусоидальные магнитодвижущие силы первичных и вторичных обмоток заменим их эквивалентными синусоидами, участки магнитопровода на схеме представим полными комплексными магнитными сопротивлениями.

АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

В соответствии с конструктивной схемой трансформатора на Рис. 1 и его электрической цепью на Рис. 2 составлена схема замещения его магнитной цепи на Рис. 3. На рисунке использованы следующие обозначения:

$\dot{F}_{mA1}, \dot{F}_{mA2}, \dot{F}_{mB1}, \dot{F}_{mB2}, \dot{F}_{mC1}, \dot{F}_{mC2}$ – комплексные амплитудные значения магнитодвижущих сил первых и вторых секций первичных обмоток фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\dot{F}_{ma1}, \dot{F}_{ma2}, \dot{F}_{mb1}, \dot{F}_{mb2}, \dot{F}_{mc1}, \dot{F}_{mc2}$ – комплексные амплитудные значения магнитодвижущих сил первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно;

$\dot{F}_{mak}, \dot{F}_{mbk}, \dot{F}_{mck}$ – комплексные амплитудные значения переменных магнитодвижущих сил, создаваемых короткозамкнутыми обмотками фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\dot{\Phi}_{0mA}, \dot{\Phi}_{0mB}, \dot{\Phi}_{0mC}$ – комплексные амплитудные значения основных результирующих магнитных потоков, протекающих в расщепленных стержнях фаз «А», «В», «С» соответственно;

$\dot{\Phi}_{0ma1}, \dot{\Phi}_{0ma2}, \dot{\Phi}_{0mb1}, \dot{\Phi}_{0mb2}, \dot{\Phi}_{0mc1}, \dot{\Phi}_{0mc2}$ – комплексные амплитудные значения основных результирующих магнитных потоков, протекающих в первых и вторых подстержнях расщепленных стержней фаз «А», «В» и «С» соответственно;

$\underline{Z}_{MAB}, \underline{Z}_{MBC}$ – полные комплексные магнитные сопротивления участков ярем между расщепленными стержнями фаз «А» и «В», «В» и «С» соответственно;

$\underline{Z}_{Ma1}, \underline{Z}_{Ma2}, \underline{Z}_{Mb1}, \underline{Z}_{Mb2}, \underline{Z}_{Mc1}, \underline{Z}_{Mc2}$ – полные комплексные магнитные сопротивления первых и вторых подстержней фаз «А», «В», «С» соответственно.

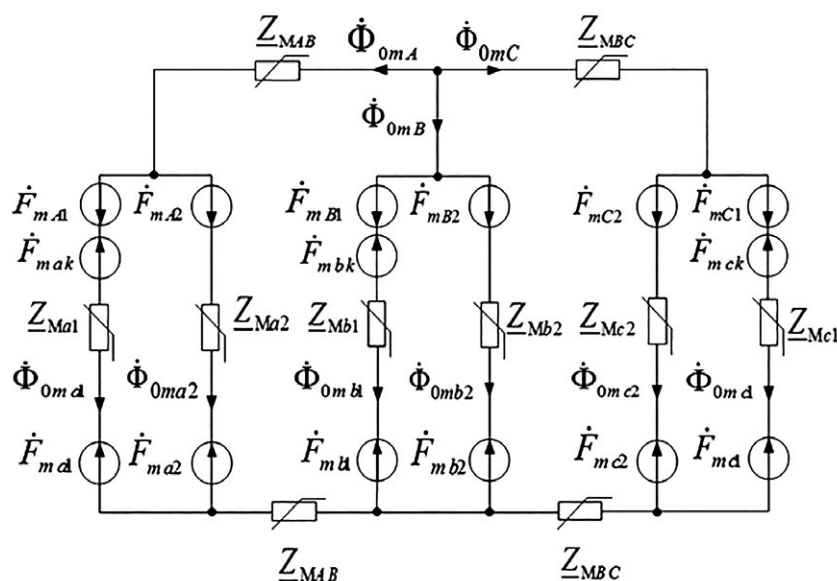


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи трансформатора с расщепленными стержнями, секционированными обмотками и короткозамкнутыми обмотками

Fig. 3. Equivalent circuit diagram of a transformer magnetic circuit with split rods, sectioned windings and short-circuited windings

Полные комплексные магнитные сопротивления [9] участков магнитопровода трансформатора в общем виде определяются как:

$$\underline{Z}_M = \frac{\dot{H}_m}{\dot{B}_m} \frac{l}{S} = \frac{l}{\mu S} \quad (1)$$

где $\dot{H}_m$ – комплексное амплитудное значение напряженности магнитного поля материала участка магнитопровода трансформатора, $\dot{B}_m$ – комплексное амплитудное значение индукции магнитного

поля материала участка магнитопровода трансформатора, l – длина участка магнитопровода трансформатора, S – площадь поперечного сечения участка магнитопровода трансформатора, $\dot{\mu}$ – комплексная магнитная проницаемость материала участка магнитопровода трансформатора.

Для магнитной цепи на Рис. 3 составим систему уравнений по I и II законам Кирхгофа [10–13] в комплексной форме для амплитудных значений без учета потоков рассеяния:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{0mA} = \dot{\Phi}_{0ma1} + \dot{\Phi}_{0ma2}, \\ \dot{\Phi}_{0mB} = \dot{\Phi}_{0mb1} + \dot{\Phi}_{0mb2}, \\ \dot{\Phi}_{0mC} = \dot{\Phi}_{0mc1} + \dot{\Phi}_{0mc2}, \\ \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0ma1} \underline{Z}_{Ma1} = \dot{F}_{mA2} - \dot{F}_{ma2} + \dot{F}_{ma1} + \dot{F}_{mak} - \dot{F}_{mA1}, \\ \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} - \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} = \dot{F}_{mB2} - \dot{F}_{mb2} + \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mB1}, \\ \dot{\Phi}_{0mc1} \underline{Z}_{Mc1} - \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} = \dot{F}_{mC1} - \dot{F}_{mck} - \dot{F}_{mc1} + \dot{F}_{mc2} - \dot{F}_{mC2}, \\ -2\dot{\Phi}_{0mA} \underline{Z}_{MAB} + \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} - \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} = \dot{F}_{mB1} - \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{ma2} - \dot{F}_{mA2}, \\ 2\dot{\Phi}_{0mC} \underline{Z}_{MBC} + \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} - \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} = \dot{F}_{mC2} - \dot{F}_{mc2} + \dot{F}_{mb2} - \dot{F}_{mB2}, \end{array} \right. \quad (2)$$

Выражения для напряжений секций вторичных обмоток можно записать в комплексной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{ma1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0ma1} - R_{a1} \dot{I}_{ma}, \\ \dot{U}_{ma2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0ma2} - R_{a2} \dot{I}_{ma}, \\ \dot{U}_{mb1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0mb1} - R_{b1} \dot{I}_{mb}, \\ \dot{U}_{mb2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0mb2} - R_{b2} \dot{I}_{mb}, \\ \dot{U}_{mc1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0mc1} - R_{c1} \dot{I}_{mc}, \\ \dot{U}_{mc2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0mc2} - R_{c2} \dot{I}_{mc}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\dot{U}_{ma1}, \dot{U}_{ma2}, \dot{U}_{mb1}, \dot{U}_{mb2}, \dot{U}_{mc1}, \dot{U}_{mc2}$ – комплексные амплитудные значения напряжений первых и вторых секций вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно; $\dot{I}_{ma}, \dot{I}_{mb}, \dot{I}_{mc}$ – комплексные амплитудные значения токов, протекающих в проводах вторичных обмоток фаз «А», «В», «С» соответственно; w_{21} и w_{22} – число витков первой

и второй секций вторичных обмоток фаз трансформатора соответственно ($w_{21} > w_{22}$).

Комплексные амплитудные значения результирующих напряжений вторичных обмоток трансформатора определяются как:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ma} = \dot{U}_{ma1} + \dot{U}_{ma2}, \\ \dot{U}_{mb} = \dot{U}_{mb1} + \dot{U}_{mb2}, \\ \dot{U}_{mc} = \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2}, \end{cases} \quad (4)$$

С другой стороны, рассматривая, например, фазу «А» трансформатора, напряжение вторичной обмотки можно записать как:

$$\dot{U}_{ma} = \dot{I}_{ma} (\underline{Z}_{a1} + \underline{Z}_{a2}) = \dot{I}_{ma} \left(\frac{j\omega w_{21}^2}{\underline{Z}_{Ma1}} + \frac{j\omega w_{22}^2}{\underline{Z}_{Ma2}} \right), \quad (5)$$

где $\underline{Z}_{a1}$, $\underline{Z}_{a2}$ – полные комплексные электрические сопротивления секций вторичной обмотки фазы «А» трансформатора; $\underline{Z}_{Ma1}$, $\underline{Z}_{Ma2}$ – полные комплексные магнитные сопротивления подстержней фазы «А» трансформатора.

Следует учесть, что при протекании магнитного потока $\dot{\Phi}_{0ma1}$ по первому подстержню в первой секции вторичной обмотки наводится электродвижущая сила $\dot{E}_{0ma1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0ma1}$, а в обмотке с короткозамкнутыми витка w_k наводится электродвижущая сила $\dot{E}_{0mk}$. Под действием $\dot{E}_{0mk}$ в проводах короткозамкнутой обмотки протекает ток $\dot{I}_{mak}$, создающий магнитный поток $\dot{\Phi}_{0mak}$.

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{0mak}$ частично компенсирует поток $\dot{\Phi}_{0ma1}$, в результате магнитная проницаемость материала первого подстержня уменьшается, материал подстержня размагничивается.

Таким образом, можно записать выражение для $\dot{\Phi}_{0ma1}$:

$$\dot{\Phi}_{0ma1} = \frac{\dot{F}_{mak}}{\underline{Z}_{Ma1}} = \frac{w_k \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1}}{j\omega w_{21}^2}, \quad (6)$$

Тогда напряжение вторичной обмотки определяется как:

$$\dot{U}_{ma} = \frac{w_k}{w_{21}} \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1} (\dot{I}_{ma}) + \dot{I}_{ma} \underline{Z}_{a2} (\dot{I}_{ma}), \quad (7)$$

где $\underline{Z}_{a1}(\dot{I}_{ma}) = \frac{\dot{U}_{ma1}(\dot{I}_{ma})}{\dot{I}_{ma}}$, $\underline{Z}_{a2}(\dot{I}_{ma}) = \frac{\dot{U}_{ma2}(\dot{I}_{ma})}{\dot{I}_{ma}}$.

Экстремум функции $\dot{U}_{ma}(I_{ma})$ определим из уравнения:

$$\frac{d\dot{U}_{ma}(I_{ma})}{dI_{ma}} = 0. \quad (8)$$

Так из выражения (8) с учетом (6) и (7) можно получить нелинейное [14] дифференциальное уравнение:

$$\frac{w_k}{w_{21}} \left(\frac{dI_{mak}}{dI_{ma}} \frac{\dot{U}_{ma1}}{I_{ma}} + \frac{I_{mak}}{I_{ma}} \frac{d\dot{U}_{ma1}}{dI_{ma}} - \frac{\dot{U}_{ma1} I_{mak}}{I_{ma}^2} \right) + \frac{d\dot{U}_{ma2}}{dI_{ma}} = 0. \quad (9)$$

В уравнение (9) входят компоненты $\frac{d\dot{U}_{ma1}}{dI_{ma}}$ и $\frac{d\dot{U}_{ma2}}{dI_{ma}}$, отвечающие за скорость изменения напряжений $\dot{U}_{ma1}$ и $\dot{U}_{ma2}$ секций вторичной обмотки и магнитных поток подстержней, так как $\dot{\Phi}_{0ma1} = \frac{\dot{U}_{ma1}}{j\omega w_{21}}$ и $\dot{\Phi}_{0ma2} = \frac{\dot{U}_{ma2}}{j\omega w_{22}}$.

В уравнение (9) также входит выражение $\frac{dI_{mak}}{dI_{ma}}$, отвечающее за скорость нарастания тока в витках короткозамкнутой обмотки.

Отсюда следует, что стабилизирующие свойства трехфазного трансформатора будут определяться не только магнитной «разбалансировкой» материалов подстержней, но и характером изменения амплитудного значения тока в короткозамкнутых витках.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

Решение уравнения (9) для модулей напряжений $\dot{U}_{ma1}$ и $\dot{U}_{ma2}$ приведено на Рис. 4, для начальных фаз напряжений секций вторичной обмотки – на Рис. 5.

На Рис. 4 при $I_{ma} = 0$ разница между напряжениями секций вторичной обмотки составляет $\Delta U_{ma12} = 3064$ В, ток короткозамкнутой обмотки размагничивает материал первого подстержня. Следовательно, индуктивность первой секции вторичной обмотки больше, чем первой, и $|\Psi_{U_{ma1}}| > |\Psi_{U_{ma2}}|$ (Рис. 5).

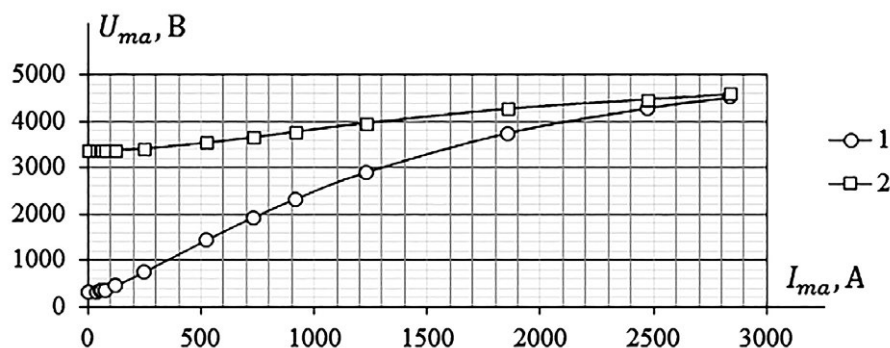


Рис. 4. Токовые зависимости напряжений секций вторичной обмотки
(кривая 1 – $U_{ma1}(I_{ma})$, кривая 2 – $U_{ma2}(I_{ma})$)

Fig. 4. Current dependences of voltages of secondary winding sections
(curve 1 – $U_{ma1}(I_{ma})$, curve 2 – $U_{ma2}(I_{ma})$)

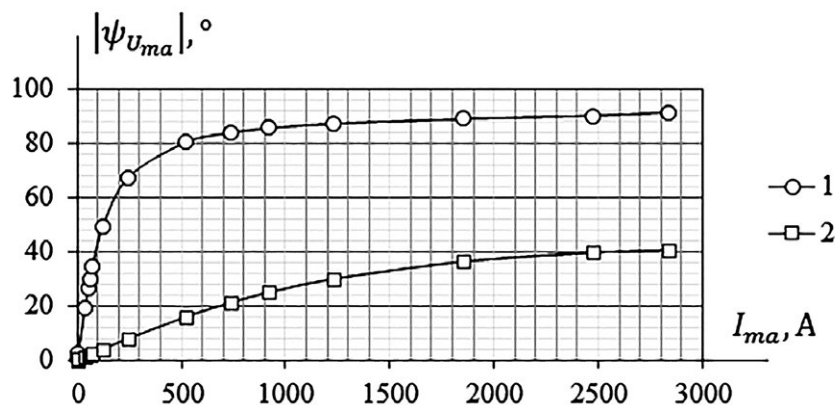


Рис. 5. Токовые зависимости начальных фаз напряжений секций вторичной обмотки
(кривая 1 – $|\psi_{U_{ma1}}|(I_{ma})$, кривая 2 – $|\psi_{U_{ma2}}|(I_{ma})$)

Fig. 5. Current dependencies of the initial phases of the voltages of the secondary winding sections (curve 1 – $|\psi_{U_{ma1}}|(I_{ma})$, curve 2 – $|\psi_{U_{ma2}}|(I_{ma})$)

При $I_{ma} = 2000$ А и $I_{ma} = 2400$ А разница между напряжениями секций ΔU_{ma12} составит 514 В и 186 В соответственно. При дальнейшем увеличении тока, когда $I_{ma} > 2800$ А, $\Delta U_{ma12} \rightarrow 0$, ток I_{mak} короткозамкнутой обмотки не оказывает размагничивающего действия на материал первого подстержня, трансформатор теряет свои стабилизирующие свойства.

На Рис. 6 приведены графики изменения амплитудного значения и начальной фазы тока короткозамкнутой обмотки. Увеличение модуля тока $\dot{I}_{mak}$ обусловлено увеличением магнитного потока $\dot{\Phi}_{0ma1}$, а значит и $\dot{\Psi}_{0mak} = L_{ak} \dot{I}_{mak}$ (L_{ak} – индуктивность короткозамкнутой обмотки,

$\dot{\Psi}_{0mak}$ – комплексное амплитудное значение потокоцепления короткозамкнутой обмотки). Так как индуктивность L_{ak} будет уменьшаться, то и начальная фаза $\psi_{I_{mak}}$ будет резко уменьшаться [15] на Рис. 6 б).

Из графика на Рис. 6 следует, что при $I_{ma} = 2000$ А и $I_{mak} = 2000$ А, $|\psi_{I_{mak}}| = 2^\circ$, при $I_{ma} > 2800$ А $|\psi_{I_{mak}}| = 0^\circ$, то есть материал первого подстержня насыщен и стабилизирующие свойства не проявляются.

Кроме того, если в выражении (9) считать $\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} = 1$, тогда получаем уравнение:

$$\frac{w_k}{w_{21}} \frac{d\dot{U}_{ma1}}{d\dot{I}_{ma}} + \frac{d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}} = 0. \quad (10)$$

В соответствии с конструкцией обмоток трансформатора $\frac{w_k}{w_{21}} < 1$.

Из уравнения (10) определяется значение I_{ma} , при котором функция $U_{ma}(I_{ma})$ достигает экстремума в соответствии с выражением (8). На Рис. 7 показаны зависимости изменения напряжений секций вторичной обмотки от тока вторичной обмотки.

Из графиков на Рис. 7 следует, что при $I_{ma} = 2000$ А $\frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}} = \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}$ или для потоков $k \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$, где $k < 1$. На Рис. 8 представлены

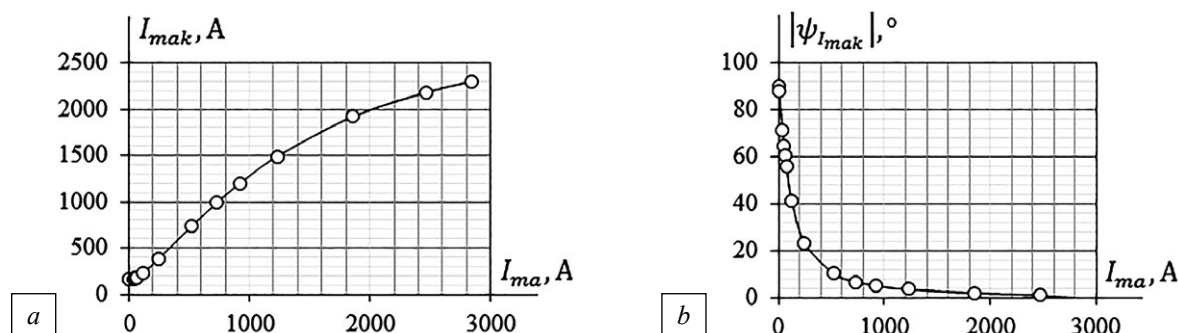


Рис. 6. Зависимость тока короткозамкнутой обмотки а) и его начальной фазы б) от тока вторичной обмотки трансформатора

Fig. 6. Dependence of the short-circuited winding current а) and its initial phase б) on the secondary winding current of the transformer

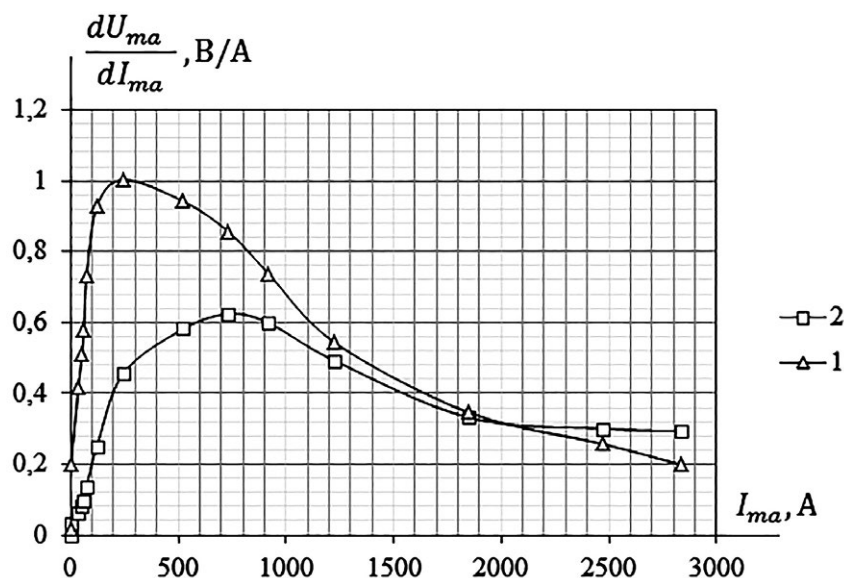


Рис. 7. Токовые зависимости изменения напряжений секций вторичной обмотки

$$\left(\text{кривая 1} - \frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma}), \text{ кривая 2} - \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma}) \right)$$

Fig. 7. Current dependences of voltage changes in secondary winding sections (curve 1 –

$$\frac{w_k}{w_{21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma}), \text{ curve 2} - \frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma}))$$

кривые относительных магнитных проницаемостей материала подстержней фазы «А» трансформатора. При $I_{ma} = 2000 \text{ А}$ $\mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}$.

В ходе предварительного расчета трансформатора [5] было установлено, что номинальное значение тока вторичной обмотки трансформатора составляет $I_{ma} = 2000 \text{ А}$, этому значению соответствует номинальное значение тока первичной обмотки трансформатора $I_{mA} = 300 \text{ А}$.

В соответствии с [16], максимальное значение коэффициента допустимой длительной перегрузки трансформатора (без ограничения длительности в режиме без повышенного износа изоляции) составляет 1,2, минимальное значение – 0,82. Коэффициент $K_{\text{доп}}$ определяется как:

$$K_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток трансформатора, $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора.

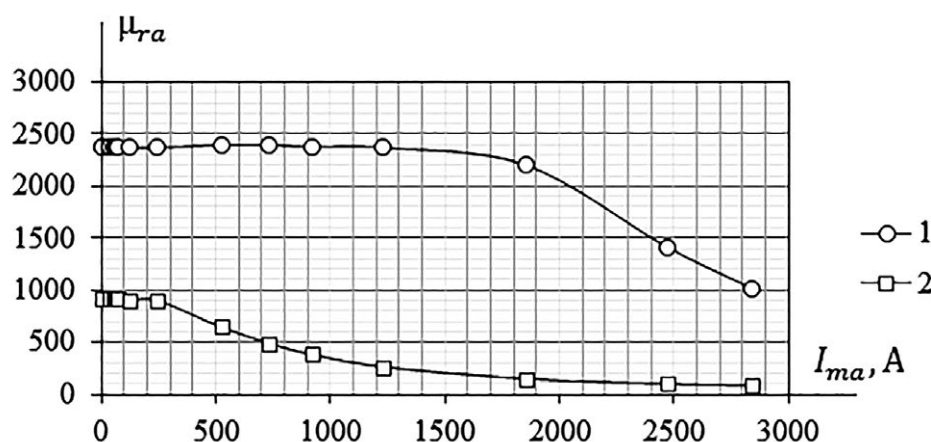


Рис. 8. Относительные магнитные проницаемости материала подстержней
(кривая 1 - $\mu_{ra1}(I_{ma})$, кривая 2 - $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

Fig. 8. Relative magnetic permeabilities of the subrod material
(curve 1 - $\mu_{ra1}(I_{ma})$, curve 2 - $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

Тогда при амплитудном значении тока вторичной обмотки 2000 А амплитудное значение тока допустимой длительной перегрузки вторичной обмотки трансформатора составит 2400 А. На Рис. 9 представлена внешняя характеристика трансформатора со стабилизирующими свойствами, полученная в результате решения уравнения (8).

Из Рис. 9 видно, что при номинальном значении тока вторичной обмотки 2000 А, напряжение вторичной обмотки $U_{ma} = 3715$ В (действующее значения $U_a = 2627$ В). При токе допустимой длительной перегрузки 2400 А $U_{ma} = 3710$ В (действующее значения $U_a = 2623$ В), то есть отклонение не более чем 0,14%.

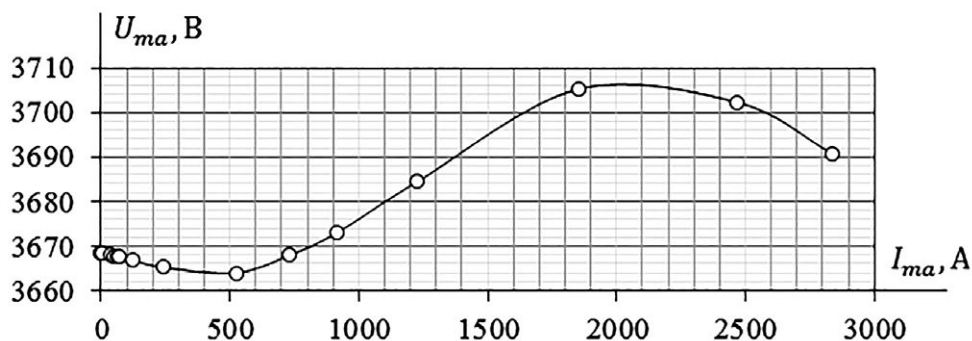


Рис. 9. Внешняя характеристика трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами

Fig. 9. External characteristics of a three-phase transformer with stabilizing properties

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ магнитной цепи разработанного трехфазный трансформатора и численный расчет его электромагнитного поля показали, что в окрестностях точки с $I_{ma} = 2000$ А на кривой внешней характеристики, стабилизирующие свойства проявляются при следующих условиях:

$$1. \quad k \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}, \text{ где } k < 1.$$

$$2. \quad I_{ma} = I_{mak}.$$

$$3. \quad \mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}.$$

Также установлено, что при протекании по вторичной обмотке трансформатора тока, близкого по значению к току допустимой длительной перегрузки, напряжение вторичной обмотки уменьшится лишь на 0,14% от своего номинального значения.

При токе $I_{ma} \geq 2800$ А превышающем ток допустимой длительной перегрузки более чем на 15%, трансформатор утрачивает свои стабилизирующие свойства. Такие изменения тока отразятся не только на стабилизирующей функции трансформатора, но и на его электродинамической стойкости.

Таким образом, назрела необходимость в комплексной оценке электродинамической и термической стойкости трехфазного трансформатора со стабилизирующими свойствами в переходных процессах.

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. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986.
2. Аржанников Б.А., Фролов Л.А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ. Екатеринбург: УрГУПС, 2009.

3. Аржанников А.А. Система управляемого тягового электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных и тяжеловесных поездов // Транспорт Урала. 2012. № 1(32). С. 134-137. EDN: OWWUCJ
4. Шакиров М.А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформатора. Ч.11. Трехфазные трехстержневые трансформаторы без нейтрального провода // Электричество. 2021. № 1. С. 23-34. doi: 10.24160/0013-5380-2021-1-23-34
5. Ткачук А.А. Стабилизация напряжения контактной сети трансформаторно-выпрямительным агрегатом тяговой подстанции постоянного тока 3,3 кВ: дис....канд. техн. наук. СПб; 2017.
6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Учебник для электроэнергет., электротехн. и радиотехн. спец. вузов. Т.2, Ч.3: Теория нелинейных электрических и магнитных цепей; Ч.4: Теория электромагнитного поля. Л.: Энергоиздат, 1981.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2014.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике: для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986.
9. Христинич А.Р. Теоретические основы электротехники: учебное пособие. Иркутск: ИрГУПС, 2023.
10. Иванов С.Н., Ким К.К., Просолович А.А., Хисматулин М.И. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3(51). С. 29-38. EDN: CLTWBH doi: 10.17084/20764359-2021-51-29
11. Иванов С.Н., Ким К.К., Приходченко О.В., Просолович А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1. № 1(41). С. 37-44. EDN: AKBSNQ
12. Ким К.К., Колесник М.Б., Иванов С.Н. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 2. С. 45-50. EDN: DTTUJR doi: 10.17213/0136-3360-2022-2-45-500
13. Ким К.К., Иванов С.Н. Моделирование комбинированного электропривода // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 3. С. 44-50. EDN: GQNKGU doi: 10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
14. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022.
15. Афанасьев А.Ю. Теоретические основы электротехники: учебное пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2023.
16. Приказ Минэнерго России от 08.02.2019 N 81 (ред. от 03.08.2023) «Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее

поддержанию и о внесении изменений в Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утвержденные приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. N 229» (Зарегистрировано в Минюсте России 28.03.2019 N 54199). Дата обращения 04.05.2025. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_321351/

REFERENCES

1. Bej YuM, Mamoshin RR, Pupynin VN, SHalimov MG. *Tyagovye podstancii*. Textbook for universities of railway transport. Moscow: Transport; 1986. (In Russ.)
2. Arzhannikov BA, Frolov LA. *Avtomatischeskoe regulirovanie napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV*. Yekaterinburg: UrGUPS; 2009. (In Russ.)
3. Arzhannikov AA. *Sistema upravlyаемого tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka dlya propuska skorostnyh i tyazhelovesnyh poezdov*. *Transport Urala*. 2012;1(32):134-137. (In Russ.)
4. Shakirov MA. The Poynting vector and the new theory of a transformer. Part 11. Three-phase three-core transformers without a neutral wire. *Electrical Technology Russia*. 2021;1:23-34. (In Russ.) doi: 10.24160/0013-5380-2021-1-23-34
5. Tkachuk AA. *Stabilizaciya napryazheniya kontaktnoj seti transformatorno-vypriamitel'nyim agregatom tyagovoj podstancii postoyannogo toka 3,3 kV* [dissertation]. St. Petersburg; 2017. (In Russ.)
6. Nejman LR, Demirchyan KS. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. Vol. 2, Part 3: Theory of nonlinear electric and magnetic circuits; Part 4: *Theory of electromagnetic field*. Leningrad: Energoizdat; 1981.
7. Bessonov LA. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi*. Moscow: Yurait; 2014.
8. Bronshtejn IN, Semendyaev KA. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov*. Moscow: Nauka. 1986.
9. Hristinich AR. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: textbook*. Irkutsk: IrGUPS; 2023. 107 p. (In Russ.)). Доступно по: <https://e.lanbook.com/book/407465> Ссылка активна на: 04.05.2025.
10. Ivanov SN, Kim KK, Prosolovich AA, Hismatulin MI. Electromechanical system analysis with simulation methods. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;3(51):29-38. (In Russ.) EDN: CLTWBH doi: 10.17084/20764359-2021-51-29
11. Ivanov SN, Kim KK, Prihodchenko OV, Prosolovich AA. Theoretical foundations of mathematical modeling of power conversion processes in combined power devices. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;1(41):37-44. (In Russ.) EDN: AKBSNQ
12. Kim KK, Kolesnik MB, Ivanov SN. Modeling the stability of an electromechanical converter with axial loads. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2022;65(2):45-50. (In Russ.) EDN: DTTUJR doi: 10.17213/0136-3360-2022-2-45-500

13. Kim KK, Ivanov SN. Modeling of the combined electric drive. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2019;62(3):44-50. (In Russ.) EDN: GQNKGU doi: 10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
14. Demidovich BP, Maron IA, Shuvalova EZ. *Chislennye metody analiza. Priblizhenie funkcij, differencial'nye i integral'nye uravneniya*: textbook. 5th ed. St.Petersburg: Lan'; 2022. 400 p. (In Russ.)
15. Afanas'ev AYu. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*: textbook. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 208 p. (In Russ.)
16. Prikaz Minenergo Rossii ot 08.02.2019 N 81 (red. ot 03.08.2023) «Ob utverzhdenii trebovanij k peregruzochnoj sposobnosti transformatorov i avtotransformatorov, ustanovlennyh na ob»ektah elektroenergetiki, i ee podderzhaniyu i o vnesenii izmenenij v Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii, utverzhdennye prikazom Minenergo Rossii ot 19 iyunya 2003 g. N 229» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 28.03.2019 N 54199). Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_321351/ (In Russ.)

Сведения об авторе:

Ткачук Антон Андреевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 7335-2340; ORCID: 0000-0002-6141-3568;
E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru

Information about the author:

Anton A. Tkachuk, Cand. Sci. (Engineering), associate professor;
eLibrary SPIN: 7335-2340; ORCID: 0000-0002-6141-3568;
E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst682002>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© В.А. Шатохин, Е.К. Чернов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕЛЕ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ФИДЕРА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ОТ НОРМАТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Обоснование. В связи с ухудшением показателей качества электроэнергии фидеров электроснабжения снижается надежность электропитания и увеличивается количество отказов аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики. В данной статье рассмотрено влияние гармоник на функционирование реле контроля напряжения, которое выдает сигнал разрешения на включение фидера под нагрузку. Актуальность исследования подтверждается увеличением количества отказов находящихся в эксплуатации реле контроля напряжения, вследствие которых возникают нештатные ситуации и задержки в движении поездов.

Цель. Уменьшить количество отказов реле контроля напряжения.

Материалы и методы. Анализ характера отказов, возникающих при эксплуатации реле контроля напряжения, физическое моделирование процессов, приводящих к отказам и синтез решений по защите от деструктивных процессов, приводящих к отказам.

Результаты. Установлена причина отказов реле контроля напряжения, смоделированы деструктивные процессы, приводящие к отказам, и предложены решения по уменьшению отказов, связанных с некачественным напряжением электропитания.

Заключение. Предложенные решения позволили снизить количество отказов реле контроля напряжения и тем самым повысить надежность электропитания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика; автоматический ввод резерва; показатели качества напряжения; гармонические искажения напряжения.

Как цитировать:

Шатохин В.А., Чернов Е.К. Обеспечение функционирования реле контроля напряжения фидера электропитания при отклонении гармонического состава напряжения электропитания от нормативных значений // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 291–306. doi: 10.17816/transsyst682002

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnical complexes and systems

© V.A. Shatohin, E.K. Chernov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**ENSURING THE OPERABILITY OF FEEDER VOLTAGE
CONTROL RELAY WHEN POWER SUPPLY VOLTAGE
HARMONICS DEVIATE FROM STANDARD VALUES**

BACKGROUND. Due to poor power quality for feeders, the power supply reliability decreases, leading to more failures of railway automation and telemetry devices. This paper discusses the influence of harmonics on the operation of a voltage control relay generating a signal to switch the feeder on load.

The relevance of the study is evidenced by the increased number of voltage control relay failures in operation, resulting in emergency situations and train delays.

AIM. To reduce the number of voltage control relay failures.

MATERIALS AND METHODS. Analysis of failures occurring during operation of voltage control relays, physical modeling of processes leading to failures and synthesis of solutions protecting from destructive processes leading to failures.

RESULTS. The authors determined the cause of voltage control relay failures, modeled destructive processes leading to failures, and proposed solutions to reduce failures associated with poor-quality power supply voltage.

CONCLUSION. The proposed solutions allowed to reduce the number of voltage control relay failures and enhance the power supply reliability of railway automation and telemetry devices.

Keywords: railway automation and telemetry devices; automatic load transfer; voltage quality indicators; harmonic voltage distortion.

To cite this paper:

Shatohin VA, Chernov EK. Ensuring the Operability of Feeder Voltage Control Relay When Power Supply Voltage Harmonics Deviate From Standard Values. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):291–306. doi: 10.17816/transsyst682002

ВВЕДЕНИЕ

Посты электрической централизации (ЭЦ), из которых осуществляется управление движением поездов, относятся к особой группе первой категории потребителей электрической энергии [1], перерыв электроснабжения которых не допускается. Для того, чтобы обеспечить надёжное электроснабжение устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) к посту ЭЦ промежуточной станции подводятся два независимых источника электропитания – два внешних фидера энергоснабжения [2]. Для крупных станций с числом централизованных стрелок более 30-ти требования по резервированию энергоснабжения более строгие. Для этой категории потребителей требуются три независимых источника питания: два внешних фидера и резервная автономная электростанция [3].

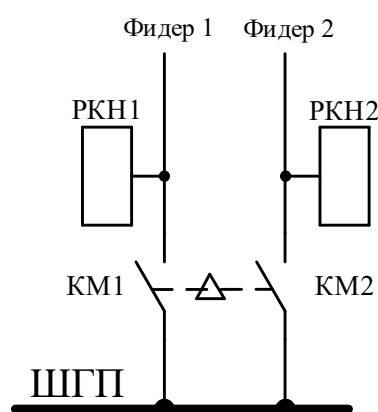


Рис. 1. Схема ввода электропитания для промежуточных станций

Fig. 1. Power entry diagram for intermediate stations

На Рис. 1 приведена схема ввода питания для станции с двумя источниками питания – фидерами питания 1 и 2. К каждому фидеру подключено реле контроля напряжения (РКН). РКН1 к первому и РКН2 ко второму. РКН непрерывно контролирует напряжение электропитания на предмет нахождения в разрешенном диапазоне между 198 и 242 вольтами. При такой схеме РКН постоянно подключен к фидеру даже в том случае, когда напряжение на фидере находится вне нормативных пределов. Далее через контакты КМ1 и КМ2 контакторов схемы автоматического ввода резерва (АВР), образуется шина гарантированного питания (ШГП). При выходе уровня питающего напряжения за эти рамки,

РКН подает команду в схему АВР, которая переключает станцию с одного фидера на другой. Отсюда следует вывод, что РКН является элементом принятия решения о переключении станции с одного источника на другой, от которого зависит надежность функционирования систем ЖАТ [4].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе эксплуатации на ряде станций Красноярской, Дальневосточной, Западно-Сибирской и др. железных дорог ОАО «РЖД» имели место случаи отказов РКН. В результате анализа отказавших РКН пришли к выводу, что характер этих повреждений является результатом термического воздействия тока на электронные компоненты, проявляющиеся в виде нагара, обугливания, изменения цвета печатной платы и т.п., показанных на Рис. 2. Не было зафиксировано других видов повреждений, например, разрывов компонентов, выноса металла, характерных в основном для импульсных помех большой энергии [5].

В качестве РКН в электропитающих установках ЖАТ применяются широко выпускаемые промышленностью реле напряжения РНПП-311М [6]. Структурная схема РНПП-311М приведена на Рис. 3.

Входной напряжение с каждой из фаз попадает на схему нормирования напряжения (НН) и схему внутреннего источника питания (ВИП), которая состоит из схемы понижения напряжения (ПН) и стабилизации (СН). Далее напряжение входного сигнала подается на анализатор (А), которым управляет схема задания критериев анализа (ЗКА). С выхода анализатора отдается команда на включение выходного коммутатора (ВК) и схеме индикации (СИ). Выходной коммутатор выполнен на реле, которое осуществляет переключения в схеме АВР.

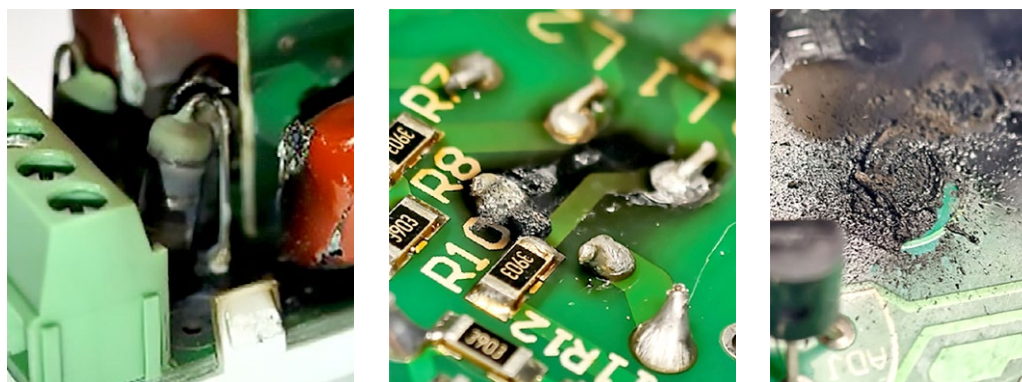


Рис. 2. Вид повреждений реле контроля напряжения

Fig. 2. Nature of damage to voltage monitoring relay

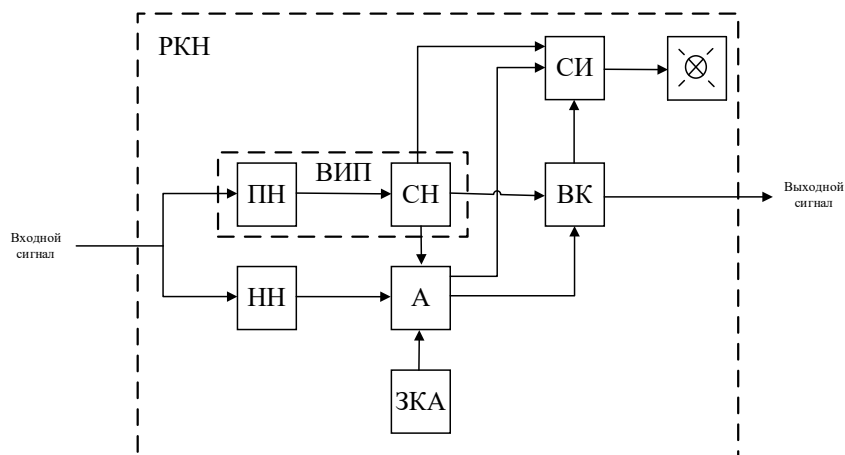


Рис. 3. Структурная схема РНПП-311М

Fig. 3. Structural diagram of RNPP-311M

На Рис. 4 показана схема электропитания РНПП-311М, по которой можно сделать вывод, что реле питается от того же источника, который и контролирует. На схеме пунктиром показаны структурные блоки, которые были рассмотрены на Рис. 3.

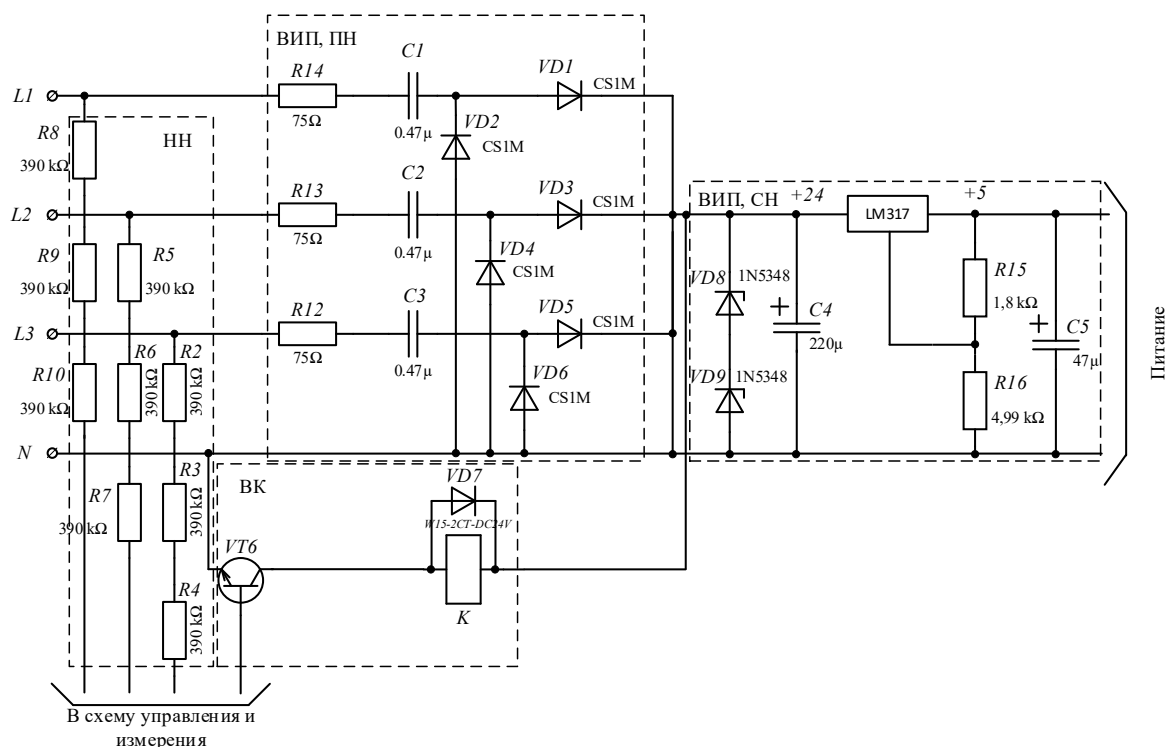


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема электропитания реле РНПП-311

Fig. 4. Power supply diagram of relay RNPP-311

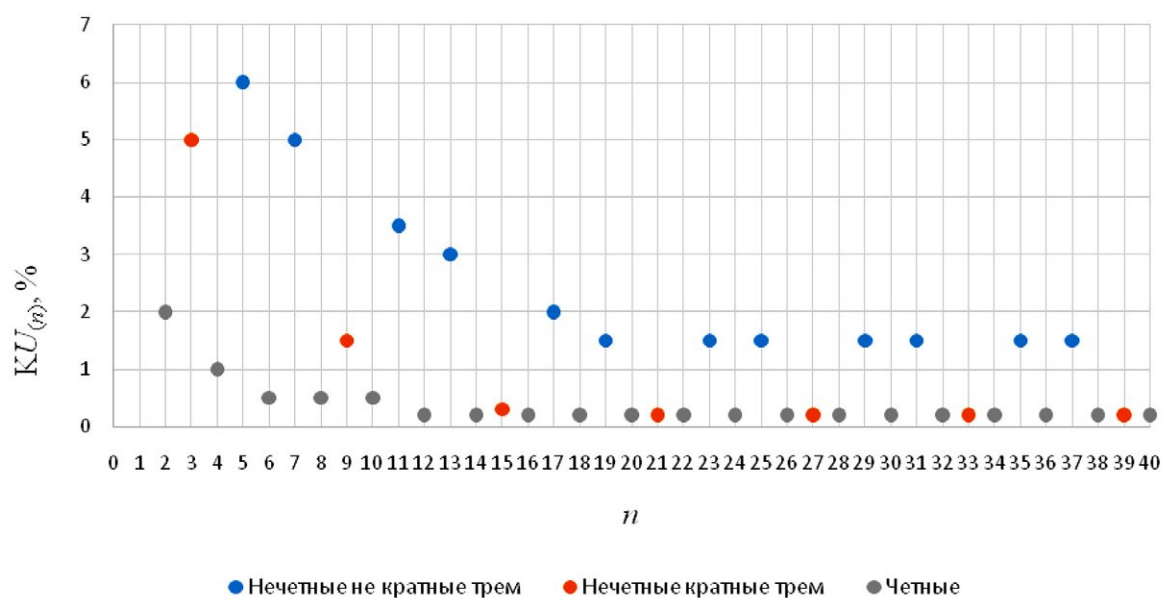
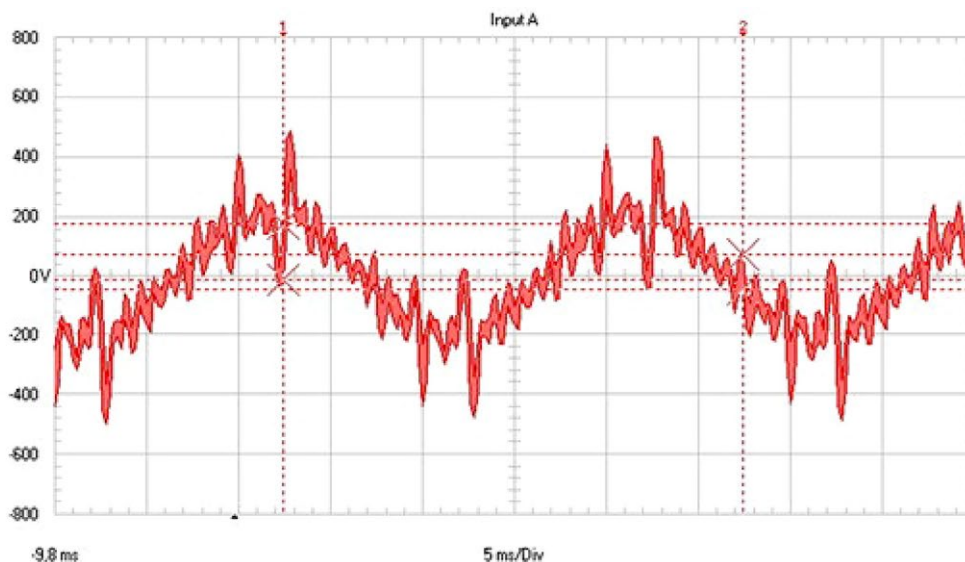
Схема нормирования напряжения НН снимает напряжения с каждой фазы через последовательно соединённые резисторы R2-R10 номиналом 390 кОм. Схема понижения напряжения ПН реализована с помощью каскада на токоограничительном резисторе и «гасящем конденсаторе», то есть «безтрансформаторная» схема питания. После этого каскада расположена схема трехфазного выпрямителя на 6-ти диодах VD1-VD6 предложенная русским учёным электротехником Андреем Николаевичем Ларионовым [7]. Каскад стабилизации напряжения СН выполнен на двух последовательно включенных стабилитронов VD8-VD9, рассчитанных на напряжение стабилизации 12 В. Конденсатор С4 сглаживает пульсации выпрямленного тока. Ещё одним элементом схемы стабилизации является стабилизатор тока LM317 вместе со своей «обвязкой» и следящим делителем, собранным на резисторах R15-R16. LM317 обеспечивает постоянство питающего напряжения 5 В на своем выходе при колебаниях выпрямленного напряжения. Это происходит, к примеру, когда имеется просадка напряжения по одной из фаз или ее отключение. Электромагнитное реле ВК включается от напряжения электропитания 24 В через транзистор VT6, который обеспечивает управление реле по сигналам от микроконтроллера анализатора.

Необходимо отметить, что качество функционирования и тепловой режим работы безтрансформаторных ВИП зависит от качества питающего напряжения, и особенно от его несинусоидальности из-за наличия гармоник высших порядков с тенденцией к их увеличению [8]. Гармоники напряжения – это паразитные колебания, которые возникают в электросетях в следствии комплекса факторов: наличие нелинейной нагрузки, дефицит мощности в энергосистеме, последствия появления переходных процессов и аварийных режимов работы и т.п.

Требования к показателям качества электроэнергии, к которым относятся и несинусоидальность, установлены в стандарте ГОСТ 32144-2013 [9]. В этом документе гармоники напряжения разделены на три большие группы: нечетные гармоники кратные трем, нечетные гармоники не кратные трем и четные гармоники. ГОСТ нормирует показатель $KU_{(n)}$ коэффициент гармонической составляющих напряжения до 40-й в процентах от основной частоты напряжения U_1 , распределение значений которого показано на Рис. 5. Номер гармоники находится как отношение ее частоты к частоте основной гармоники 50 Гц. Если номер гармоники не является целым числом, то такая гармоника называется интергармоникой, если число выше единицы, и субгармоникой, если

ниже. Кроме того, стандарт нормирует суммарный уровень гармоник, который должен составлять длительно не более 8%, кратковременно не более 12% для сети 0,38 кВ. Интересно отметить, что в документе [9] нормы интергармоник находятся «на рассмотрении» на протяжении десятилетий, а вопрос нормирования субгармоник даже не обозначен. Отсутствие нормирования интергармоник и субгармоник может создать угрозу безопасности движения поездов. Например, субгармоника 25 Гц на железнодорожном транспорте является основной рабочей частотой рельсовых цепей и сигналов АЛСН. Интергармоники 420, 480, 520, 580 Гц являются основными рабочими частотами тональных рельсовых цепей. Рельсовые цепи являются датчиками положения подвижного состава и от их корректной работы зависит безопасность ЖАТ [10]. Гармоники выше 40-ой, то есть выше 2 кГц и вовсе не пронормированы, но в статье [11] доказывается, что в сетях присутствуют уровни гармоник выше нормируемого нормативным документом уровня. Стоит отдельно отметить тот факт, что на современном железнодорожном транспорте применяются все больше вычислительной техники и другой нелинейной нагрузки, которая использует в качестве вторичного источника электропитания – импульсные источники питания [12]. Вводятся в эксплуатацию новые системы управления тяговыми приводами локомотивов, которые так же являются источниками гармонических искажений [13]. Внедрение нелинейных потребителей в систему электроснабжения и на локомотивах, несмотря на значительные преимущества, создает электромагнитные влияния в полосе частот, выше нормируемых стандартом.

Отдельно следует отметить, что межгосударственный стандарт ГОСТ 33436.4-1 – 2015 [14], устанавливающий требования электромагнитной совместимости для устройств ЖАТ, на сегодняшний день не содержит требования по устойчивости к гармоническим искажениям питающего напряжения. На практике имеют места случаи, когда при модернизации станций с релейной системой централизации на микропроцессорную присутствует рост потребляемой мощности вновь вводимой системой. Это происходит по причине того, что микропроцессорные системы непрерывно обрабатывают поступающую информацию, тогда как релейные системы реализуют большинство зависимостей при непосредственном задании маршрута. Однако при реконструкции увеличение энергопотребления микропроцессорными устройствами не приводит к реконструкции питающих линий и увеличению мощностей трансформаторов.

Рис. 5. Распределение коэффициента $KU_{(n)}$ Fig. 5. $KU_{(n)}$ coefficient distributionРис. 6. Осциллограмма питающего напряжения со станции Красноярской ЖД
(масштабы: $m_U = 200 \text{ В/кЛ}$, $m_t = 5 \text{ мс/кЛ}$)Fig. 6. Oscillogram of the supply voltage from the station of Krasnoyarsk Railway
(scale: $m_U = 200 \text{ V/div}$, $m_t = 5 \text{ ms/div}$)

Реальная картина на объектах оказывается еще хуже, чем регламентирует стандарт [9]. На Рис. 6 приведена осциллограмма напряжения питающего фидера на станции Красный Кордон Красноярской железной дороги, откуда были доставлены на диагностику отказавшие реле напряжения. Можно отметить, что форма напряжения далека от синусоидальной, а контроль напряжения даже с помощью традиционных анализаторов качества напряжения показал длительный суммарный уровень гармоник 26% от основной частоты при норме по [9] 8%, то есть был превышен более чем в три раза.

ИСПЫТАНИЯ РЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Для проверки гипотезы отказов РКН из-за ненормированных значений гармонических искажений проведено физическое моделирование, схема которого показана на Рис. 7а. В качестве генератора применен аттестованный испытательный генератор ИГУ-16.1 производства НПП «ПРОРЫВ» г. Петрозаводск. На Рис. 7б показана осциллограмма тока и напряжения в штатном режиме работы РКН при подаче от генератора «чистой» синусоиды.

На Рис. 8 показаны термограммы РКН в штатном режиме работы в течении 30-ти минут с трех сторон, из которых видно, что наибольшее тепловыделение приходится на гасящие резисторы.

Критический нагрев токоограничительных резисторов, когда тепловая мощность рассеяния на них превышает 1 Вт, происходит при входном токе свыше 0,115 мА. При воздействии на реле нормативными значениями

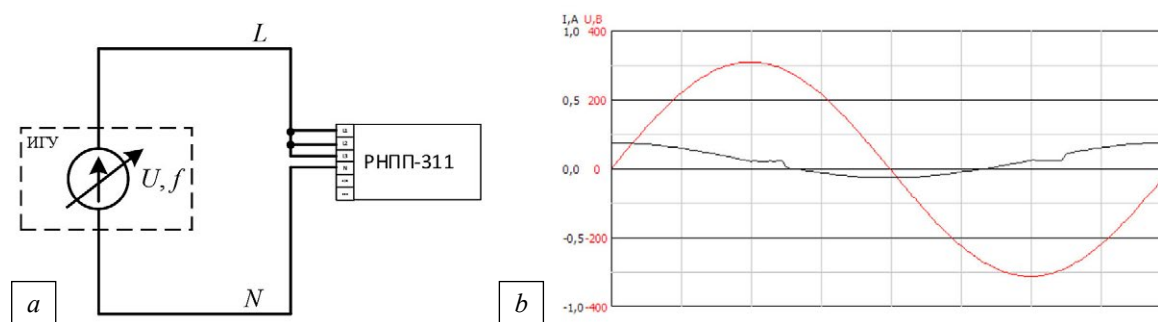


Рис. 7. а) схема моделирования, б) осциллограмма напряжений и токов штатного режима (масштабы: $m_U = 100 \text{ В/кЛ}$, $m_I = 0,25 \text{ А/кЛ}$, $m_t = 2,5 \text{ мс/кЛ}$)

Fig. 7. а) modelling scheme, б) oscillogram of voltages and currents of normal mode (scale: $m_U = 100 \text{ В/div}$, $m_I = 0,25 \text{ А/div}$, $m_t = 2,5 \text{ мс/div}$)

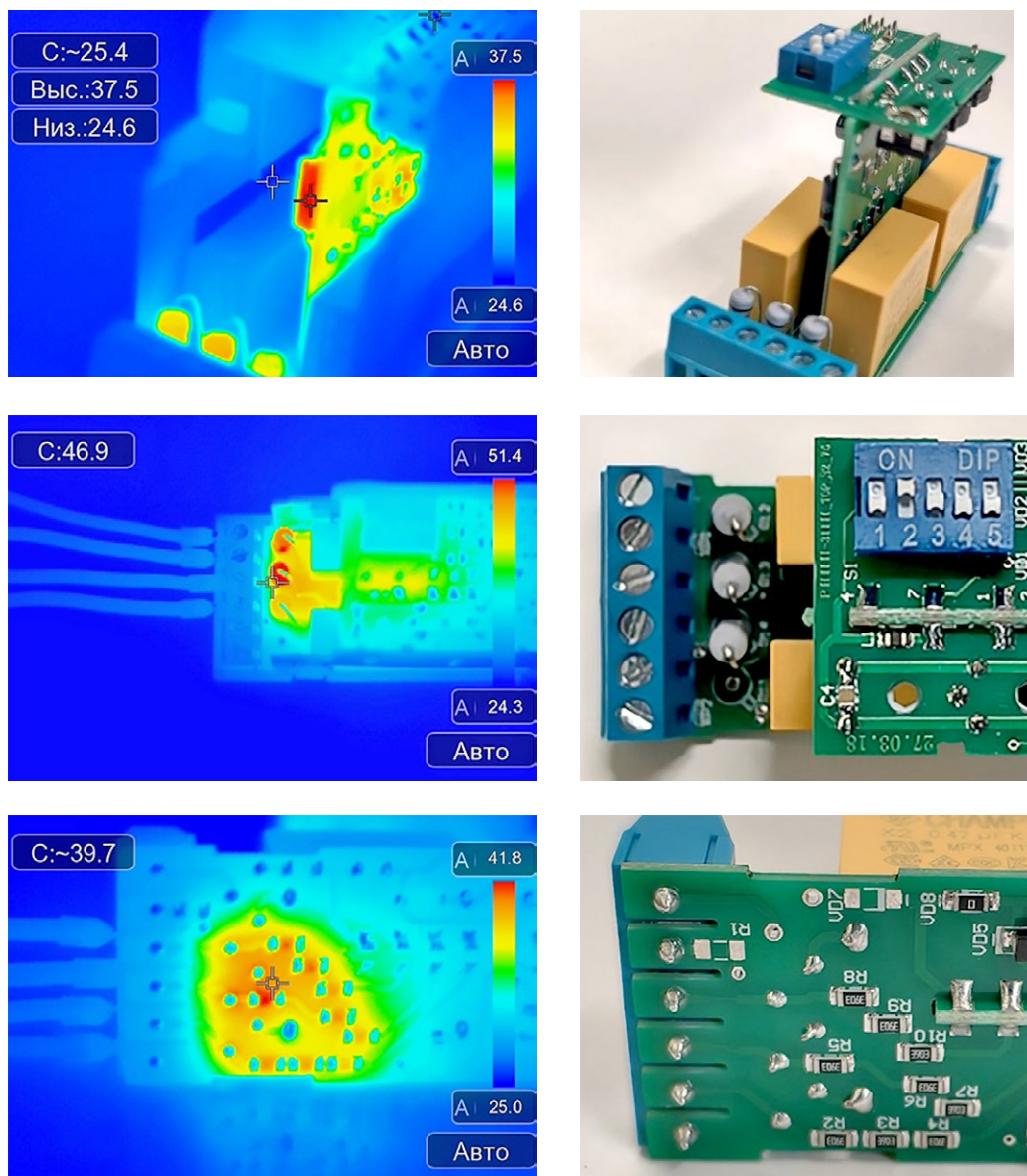


Рис. 8. Термограммы РКН в штатном режиме
Fig. 8. Thermograms RNPP-311 in normal mode

гармоник из [9] входной ток увеличивался на 5–6 мА и эти воздействия не приводили к критичному перегреву. На Рис. 9 показана осциллограмма напряжения красным цветом и ток черным цветом при подмешивании к основной частоте 89-й гармоники (частота 4450 Гц) с действующим значением 7 В. Суммарный коэффициент гармоник напряжения составляет в этом случае 3,21%, что не превышает допустимых значений по [9].

На Рис. 10а показана термограмма поверхности резисторов перед началом эксперимента, а на Рис. 10b термограмма по истечении

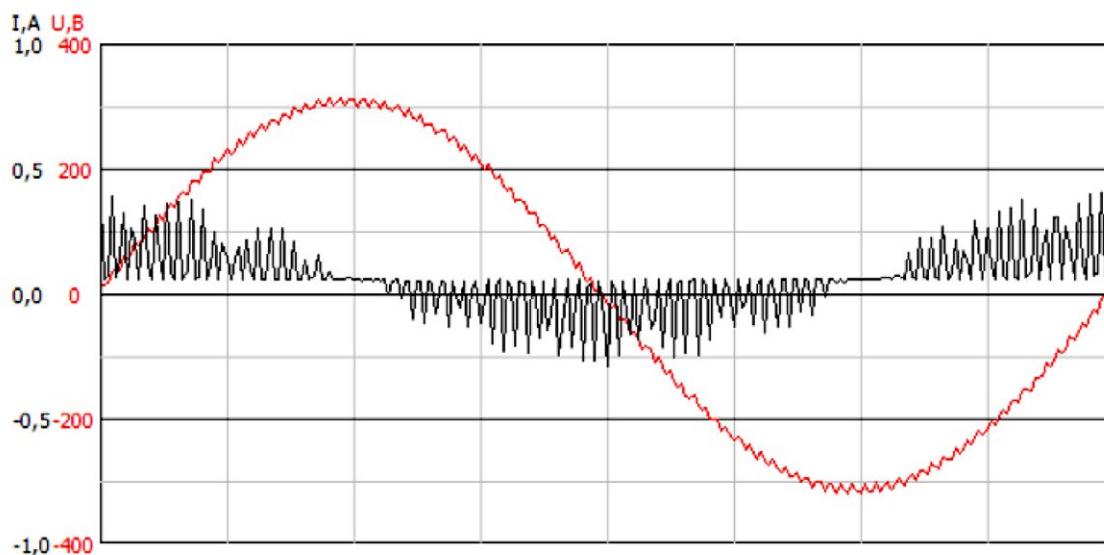


Рис. 9. Осциллограмма токов и напряжения реле РНПП-311М в режиме со сверхнормируемой гармоникой (масштабы:
 $m_U = 100 \text{ A}/\text{div}$, $m_I = 0,25 \text{ A}/\text{div}$, $m_t = 2,5 \text{ ms}/\text{div}$)

Fig. 9. Oscillogram of currents and voltages of RNPP-311M relay in the over-normalised harmonic mode (scale: $m_U = 100 \text{ V}/\text{div}$, $m_I = 0,25 \text{ A}/\text{div}$, $m_t = 2,5 \text{ ms}/\text{div}$)

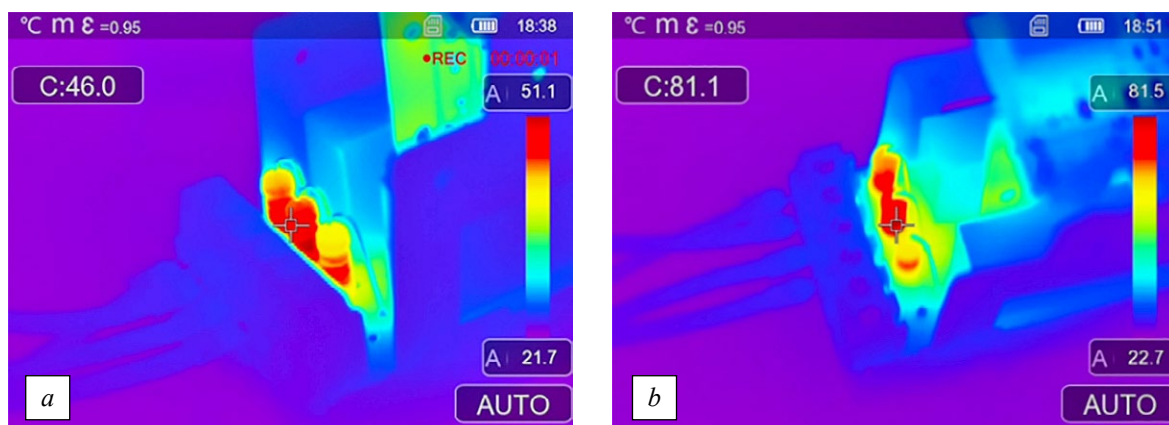


Рис. 10. а) термограмма поверхности РКН во время начала эксперимента,
 б) термограмма поверхности РКН по прошествии 15-ти минут

Fig. 10. а) surface thermogram RNPP-311 at the beginning of the experiment,
 б) surface thermogram RNPP-311 after 15 minutes

13-ти минут, на которой видно, что температура резисторов увеличилась с 46-ти до 81°C. Более длительного воздействия не проводилось в связи с опасностью возгорания.

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Первый вариант решения проблемы, который использовали некоторые производители РКН, предполагал использование в качестве гасящего конденсатора, так называемые, X-Y конденсаторы подавления электромагнитных помех, которые отличаются более высокой стойкостью к изменениям напряжения и имеют меньший показатель ESR (расшифровать). Данный вариант не привел к существенному снижению количества отказов РКН в процессе эксплуатации.

Второй вариант предполагает замену бестрансформаторного ВИП на другой, менее чувствительный к гармоникам напряжения. По данному пути производители РКН не пошли из-за удорожания изделия и, тем самым, снижения конкурентоспособности, но в качестве компромиссного решения стали выпускать реле типа РНПП-311 с добавочным индексом «М» с возможностью организации электропитания от внешнего ВИП. Такие реле эксплуатируются в питающих установках на железнодорожных станциях, построенных или реконструированных с 2009 года, а также данным реле оборудованы электропитающие установки ЖАТ в Петербургском метрополитене. Данный вариант решения позволил незначительно снизить количество отказов РКН, но кардинально решить проблему не удалось.

По третьему варианту решение проблемы гармонических искажений при помощи фильтрокомпенсирующих устройств для электропитания систем ЖАТ и вовсе не производилось на практике из-за дороговизны такого решения. Установки фильтрокомпенсирующих устройств требует для энергетических компаний больших капиталовложений.

Предложенный авторами четвертый вариант решения оказался более оптимальным и предполагал организацию комбинированного электропитания РКН, показанный на Рис. 11. Для электропитания нагрузок СЦБ на станции применяется система бесперебойного питания (СБП) с диагностикой и мониторингом состояния последней [15]. Электропитание РКН через внешний ВИП в первоначальный момент времени кратковременно осуществляется от фидера и переключается на СБП после ее запуска и появления напряжения на шине бесперебойного питания (ШБП). Наличие напряжения от СБП контролируют аварийные

реле, которые осуществляют переключение электропитания внешнего ВИП РКН. Внедрение данного технического решения позволило значительно снизить количество отказов РКН.

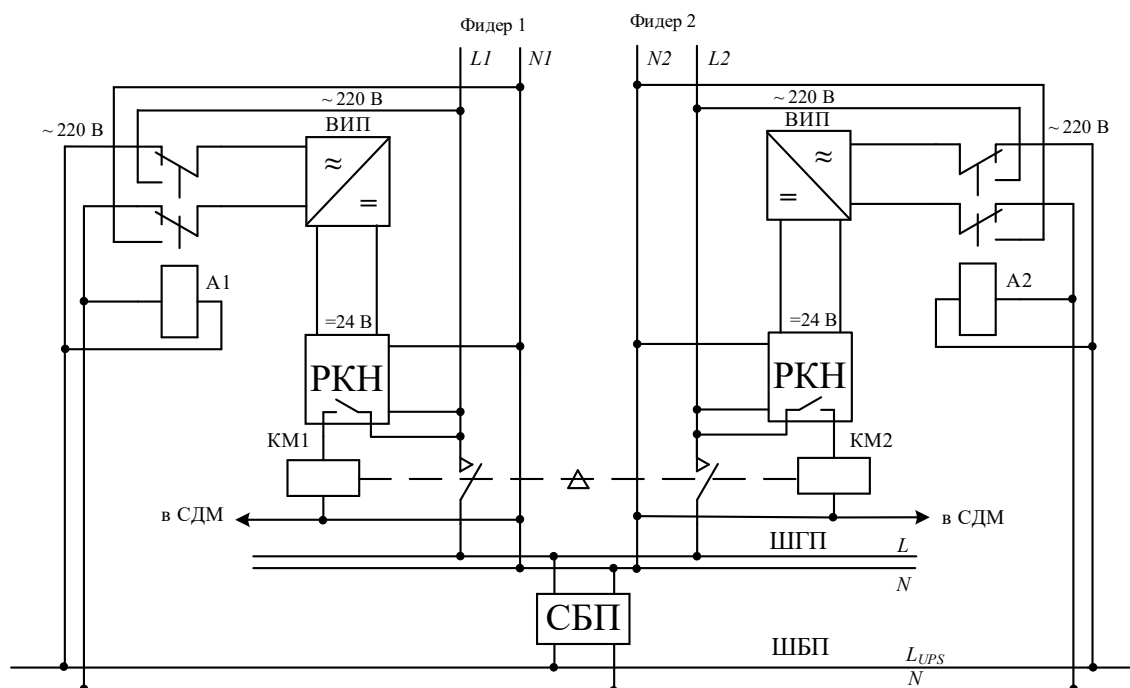


Рис. 11. Организация комбинированного электропитания РКН

Fig. 11. Organisation of power supply of RNPP-311M from the SBP bus

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несовершенство нормативного регулирования, наличие дефицита мощности, мощные нелинейные нагрузки все это в совокупности может привести к появлению в сети гармоник напряжения, не нормированных стандартом.

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. ОСТ РЖД 08.025 – 2015. Устройства электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики. Дата обращения: 10.05.2025. Режим доступа: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1463752464.pdf
2. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014.
3. Сапожников В.В., Ковалев Н.П., Кононов В.А., и др. Электропитание устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Москва: Маршрут, 2005.
4. Сапожников В.В., Шаманов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Москва: Маршрут, 2003.
5. Williams T, Armstrong K. EMC for systems and installations. Oxford; Burlington, MA: Newnes Publ., 2000.
6. Руководство по эксплуатации реле напряжения РНПП-311М. Дата обращения: 10.05.2025. Режим доступа: <https://novatek-electro.ru/downloads/РНПП-311М.pdf>
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Т. 1. Санкт-Петербург: Питер, 2003.
8. Моргунов Д.Н. Обеспечение синусоидальности напряжения в цепях питания нетяговых железнодорожных потребителей: дисс ... канд. техн. наук. Самар; 2022. EDN AOWDBC
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в сетях электроснабжения общего назначения. Утвержден и введен в действие Приказом №400-ст Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22.07.2013 г. Дата обращения: 10.05.2025. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301>
10. Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников В.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008.
11. НПФ «ЭНЕРГОСОЮЗ». Доказано: В электросетях существуют высшие гармоники с частотами выше 2 кГц. Дата обращения: 06.05.2025. Режим доступа: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/dokazano-v-elektrosetyah-sushchestvuyut-vysshie-garmoniki-s-chastotami-svyshe-2-kgc>
12. Моргунов Д.Н., Добрынин Е.В. Влияние нагрузки с импульсными источниками питания на несинусоидальность в сетях электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 5(89). С. 13-18. EDN VMQZBC
13. Кабецкий А.Г., Манаков А.Д. Нормы и методы определения электромагнитной совместимости современных систем автоматической локомотивной сигнализации и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на метрополитене // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7, № 4. С. 503-521. doi: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521 EDN EVDGAD
14. ГОСТ 33436.4-1-2015. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 4-1. Устройства и аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики Требования

и методы испытания. Утвержден и введен в действие Приказом №1730-ст Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09.11.2015 г. Дата обращения: 10.05.2025. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200126927>

15. Poroshin A., Shatokhin V., Nikitin A., Kotenko A. Diagnostics and monitoring of railway automation and remote control power supply devices. In: Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2017. IEEE, 2017. P. 592-597. EDN: YQEWCI doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110143

REFERENCES

1. OST RZHD 08.025 – 2015. Ustrojstva elektropitaniya zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. (In Russ.) Accessed: 10.05.2025. Available from: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1463752464.pdf
2. Ter-Oganov EV, Pyshkin AA. *Electricity supply for railways*. Ekaterinburg: UrGUPS; 2014. (In Russ.)
3. Sapozhnikov VV, Kovalev NP, Kononov VA, et al. *Power supply for railway automation, telemechanics and communications devices*. Moscow: Marshrut; 2005. (In Russ.)
4. Sapozhnikov VV, SHamanov VI. *Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems*. Moscow: Marshrut; 2003. (In Russ.)
5. Williams T, Armstrong K. *EMC for systems and installations*. Oxford; Burlington, MA: Newnes Publ.; 2000.
6. User manual for RNPP-311M. (In Russ.) Accessed: 10.05.2025. Available from: <https://novatek-electro.ru/downloads/PHIII-311M.pdf>
7. Demirchyan KS, Nejman LR, Korovkin NV, CHEchurin VL. *Theoretical foundations of electrical engineering*. Sankt-Peterburg: Piter; 2003. (In Russ.)
8. Morgunov DN. Ensuring sinusoidal voltage in power supply circuits of non-traction railway consumers. [dissertation]. Samara; 2022. (In Russ.) EDN AOWDBC
9. GOST R 32144-2013 ([Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]). Moscow: Gosstandart; 2014. (In Russ.)
10. Sapozhnikov VV, Kravcov YUA, Sapozhnikov VV. *Theoretical foundations of railway automation and telemechanics*. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»; 2008.
11. NPF «ENERGOSOYUZ». Dokazano: V elektrosetyah sushchestvuyut vysshie garmoniki s chastotami svyshe 2 kGc. (In Russ.) Accessed: 10.05.2025. Available from: <https://www.energsoyuz.spb.ru/ru/content/dokazano-v-elektrosetyah-sushchestvuyut-vysshie-garmoniki-s-chastotami-svyshe-2-kgc> (In Russ.)
12. Morgunov DN, Dobrynin EV. The influence of load with pulse power supplies on non-sinusoidality in power supply networks of non-traction railway consumers. *Vestnik transporta povolzh'ya*. 2021;5(89):13-18. (In Russ.) EDN: VMQZBC
13. Kabeckij AG, Manakov AD. Norms and methods for determining the electromagnetic compatibility of modern automatic locomotive signaling

- systems and electric rolling stock with an asynchronous traction drive on the subway. *Transport automation research*. 2021;7(4):503-521. (In Russ.) doi: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521
14. GOST R 33436.4-1-2015 ([Electromagnetic compatibility of technical equipment. Systems and equipment of railway transport. Part 4-1. Devices and equipment of railway automatics and telemechanics. Requirements and testing methods]). GOST [Moscow]: Gosstandart; 2015
 15. Poroshin A, Shatokhin V, Nikitin A, Kotenko A. Diagnostics and monitoring of railway automation and remote control power supply devices. In: *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2017*. 2017;592-597. EDN: YQEWCI doi: 10.1109/EWDTs.2017.8110143

Сведения об авторах:

Шатохин Виталий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 5318-5089; ORCID: 0000-0003-2167-4189

E-mail: vital@crtc.spb.ru

Чернов Егор Константинович, аспирант;

eLibrary SPIN: 4278-9776; ORCID: 0009-0000-7759-3367;

E-mail: egorsk-01@yandex.ru

Information about the authors:

Vitaly A. Shatokhin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;

eLibrary SPIN: 5318-5089; ORCID: 0000-0003-2167-4189

E-mail: vital@crtc.spb.ru

Egor K. Chernov, postgraduate student;

eLibrary SPIN: 4278-9776; ORCID: 0009-0000-7759-3367;

E-mail: egorsk-01@yandex.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst683922>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© **Б.А. Трифонов, Г.Е. Середа**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

РАСЧЕТ ТОКА НАГРУЗКИ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Обоснование. Рассматривается однофазный мостовой автономный инвертор напряжения, работающий на активно-индуктивную нагрузку. Напряжение нагрузки формируется за счет коммутации ключевых элементов схемы, форма тока определяется параметрами нагрузки и характеризуется спектром высших гармонических составляющих. В практических расчетах зачастую интерес представляет действующее значение тока нагрузки инвертора, имеющего несинусоидальную форму, определение которого сопряжено с известными вычислительными трудностями.

Цель. Разработка способа вычисления действующего значения тока нагрузки автономного инвертора напряжения, не требующего разложения кривой тока в гармонический ряд и последующего его суммирования.

Методы. Для нахождения действующего значения тока нагрузки инвертора использована теория вычетов.

Результаты. Расчет тока нагрузки автономного инвертора с помощью выражений, полученных с использованием теории вычетов, позволяет сократить объем вычислительной работы и обеспечивает высокую точность результата, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения; ток нагрузки; теория вычетов.

Как цитировать:

Трифонов Б.А., Середа Г.Е. Расчет тока нагрузки автономного инвертора напряжения методом гармонического анализа // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 307–317. doi: 10.17816/transsyst683922

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnical complexes and systems

© **B.A. Trifonov, G.E. Sereda**Emperor Alexander I St.-Petersburg State Transport University
Saint-Petersburg, Russia**CALCULATION OF LOAD CURRENT OF SELF-EXCITED
VOLTAGE INVERTER BY HARMONIC ANALYSIS**

BACKGROUND. The paper discusses a single-phase bridge self-excited inverter operating into active inductive load. The load voltage is generated by switching the key circuit elements; the current shape is determined by the load parameters and characterized by the higher harmonic spectrum. In practice, the calculations are often focused on the effective inverter load current of a non-sinusoidal shape; its determination is associated with known computational difficulties.

AIM. To develop a method to calculate the effective value load current of a self-excited inverter that does not require decomposition of the current curve into a harmonic series and its subsequent summation.

METHODS. The effective inverter load current was calculated using the theory of residues.

RESULTS. The load current of a self-excited inverter calculated based on expressions obtained using the theory of residues allows to reduce the amount of computation and ensures high accuracy, which is confirmed by experimental studies.

Keywords: self-excited inverter; load current; theory of residues.

To cite this paper:

Trifonov BA, Sereda GE. Calculation of Load Current of Self-Excited Voltage Inverter by Harmonic Analysis. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):307–317. doi: 10.17816/transsyst683922

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время характеризуется применением большого числа различных полупроводниковых преобразователей, осуществляющих преобразование электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока. [1–5].

Такая задача решается применением инверторных схем. Для надежной работы таких преобразователей требуется тщательный подбор элементов схемы, который в данный момент осуществляется применением численных методов расчета, которые требуют значительного машинного времени и дальнейшей экспериментальной проверки на опытных макетах.

Предлагается аналитический метод расчета с использованием гармонических рядов. При этом возникает проблема нахождения сумм коэффициентов гармонического ряда [6–11].

В предлагаемой работе сумма ряда находится с использованием теории вычетов, что позволяет значительно сократить получение результата (действующего значения тока нагрузки) [12–15].

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Рассмотрим работу однофазного мостового автономного инвертора напряжения на нагрузку активно-индуктивного характера. Ключевые элементы инвертора представляют собой полностью управляемые силовые полупроводниковые приборы (ГТО-тиристоры, транзисторы).

Процессы, происходящие в схеме, описываются уравнением (1), которое справедливо на интервале открытого состояния проводящей пары ключевых элементов, соответствующем половине периода T :

$$U = i_n R + \frac{di_n}{dt}, \quad (1)$$

где U – напряжение источника питания; R , L – сопротивление и индуктивность нагрузки; i_n – ток нагрузки.

Если в уравнении (1) параметры реального режима, относящиеся к цепи постоянного тока, с помощью коммутационной функции $\xi(t)$ привести к цепи переменного тока, то это уравнение приобретает вид, справедливый для любого момента времени:

$$\xi(t)U = i_n R + \frac{di_n}{dt}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) может быть представлено в виде гармонических рядов

$$i_n = \sum_k A_{1k} \cos k\omega t + \sum_k A_{2k} \sin k\omega t,$$

$$\frac{di_n}{dt} = \sum_k B_{1k} \cos k\omega t + \sum_k B_{2k} \sin k\omega t, \quad k = 1, 3, 5 \dots \quad (3)$$

После интегрирования выражения для коэффициентов ряда производной имеем

$$B_{1k} = \frac{4}{T} \left[-i_{n(T/2)} - i_{n(0)} \right] + k\omega A_{2k}, \quad (4)$$

$$B_{2k} = -k\omega A_{1k}. \quad (5)$$

Известно [1, 2], что $i_{n(T/2)} = -i_{n(0)}$ тогда

$$B_{1k} = k\omega A_{2k}.$$

Применительно к рассматриваемому случаю $U = \text{const}$, следовательно, гармонический ряд для $\xi(t)U$ будет иметь вид

$$\xi(t)U = \frac{4}{\pi} \sum_k \frac{U \sin k\omega t}{k}, \quad k = 1, 3, 5 \dots$$

По полученным выражениям для гармонических коэффициентов можно составить систему из двух уравнений:
для косинусных коэффициентов

$$0 = Lk\omega A_{2k} + A_{1k}; \quad (6)$$

для синусных коэффициентов

$$\frac{4}{\pi k} U = -k\omega L A_{1k} + A_{2k} R; \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6) и (7) дает выражения для коэффициентов соответствующего ряда тока нагрузки инвертора

$$A_{1k} = \frac{-4U\omega L}{\pi \left[R^2 + (k\omega L)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$A_{2k} = \frac{4UR}{\pi k \left[R^2 + (k\omega L)^2 \right]}. \quad (9)$$

Действующее значение k -й гармоники тока нагрузки определяется выражением:

$$I_{nk} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_{1k}^2 + A_{2k}^2} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \sqrt{\frac{1}{k^2 \left[R^2 + (k\omega L)^2 \right]}}. \quad (10)$$

Для определения действующего значения тока нагрузки I_H необходимо определить сумму ряда:

$$\sum_k \frac{1}{k^2 \left[R^2 + (k\omega L)^2 \right]}, \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (11)$$

Прямого суммирования этого ряда по всем нечетным гармоникам можно избежать, если воспользоваться теорией вычетов, с помощью которой можно найти сумму ряда (11).

Введем вспомогательную функцию комплексного переменного z :

$$f(z) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi z}{2} \right),$$

$$f(z) = \left[(zR)^2 + z^4 (\omega L)^2 \right]^{-1}. \quad (12)$$

Согласно [13, 14] имеем равенство:

$$\sum_k f(k) = \frac{\pi}{4} \sum_k \operatorname{res} f(z) \operatorname{tg} \left(\frac{\pi z}{2} \right), \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (13)$$

Определим вычеты вспомогательной функции $f(z) \operatorname{tg}(\pi z/2)$.

Корнями уравнения (12) являются

$$z_{1,2} = 0, \quad z_{3,4} = \pm j \frac{R}{\omega L}.$$

Тогда

$$\operatorname{res} f(z) = \frac{1}{\pi \left[2zR^2 + 4z^3 (z\omega L)^2 \right]}. \quad (14)$$

Подставляя значение корней z_3 и z_4 в (14), получим на основании (13) выражение для действующего значения тока нагрузки

$$I_n = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{U}{R} \sqrt{\frac{\pi}{2} - \frac{\omega L}{R} \operatorname{th}\left(\frac{\pi R}{2\omega L}\right)}. \quad (15)$$

Кроме того, представляется возможным найти значение тока в момент коммутации ключевых элементов инвертора $i_{n(0)}$, для этого необходимо найти сумму ряда (8) косинусных коэффициентов.

Введем новую вспомогательную функцию комплексного переменного z :

$$f(z) = \frac{1}{\pi \left[R^2 + (k\omega L)^2 \right]}. \quad (16)$$

Для определения вычетов функции (16) найдем корни знаменателя:

$$z_{1,2} = \pm j \frac{R}{\omega L}. \quad (17)$$

И на основании равенства (13) найдем сумму ряда для косинусных коэффициентов и выражение для тока нагрузки в момент коммутации вентилей:

$$i_n(0) = \frac{U}{R} \operatorname{th}\left(\frac{\pi R}{2\omega L}\right). \quad (18)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Достоверность выражения (15) подтверждается весьма удовлетворительным совпадением результатов расчета по этому выражению с расчетами по гармоникам с использованием выражения (10) и вполне удовлетворительным совпадением с результатами эксперимента. Эксперимент был выполнен на лабораторном стенде при частоте коммутации вентилей инвертора $f=100$ Гц для различных значений сопротивления R и индуктивности L нагрузки. Кривые токов нагрузки, полученные экспериментально, представлены на Рис. 1. Результаты эксперимента и расчетов представлены на Рис. 2.

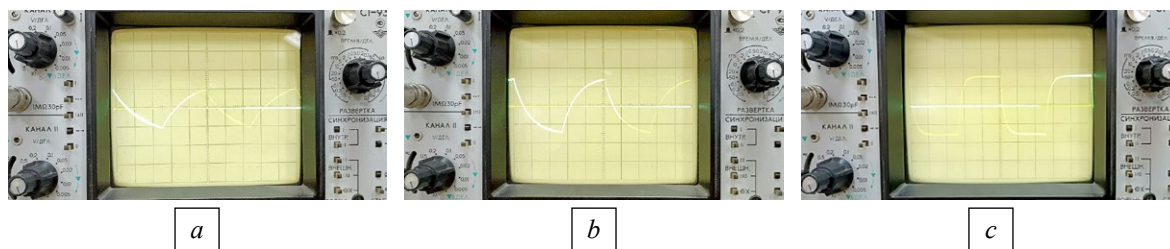


Рис. 1. Форма кривых тока нагрузки

однофазного мостового автономного инвертора напряжения:

$a - R=194 \text{ Ом}, L=0,397 \text{ Гн}; b - R=194 \text{ Ом}, L=0,2 \text{ Гн}; c - R=194 \text{ Ом}, L=0,051 \text{ Гн}$

Fig. 1. The shape of the load current curves of a single-phase bridge autonomous voltage inverter: $a - R=194 \text{ Ohm}, L=0.397 \text{ H}; b - R=194 \text{ Ohm}, L=0.2 \text{ H}; c - R=194 \text{ Ohm}, L=0.051 \text{ H}$

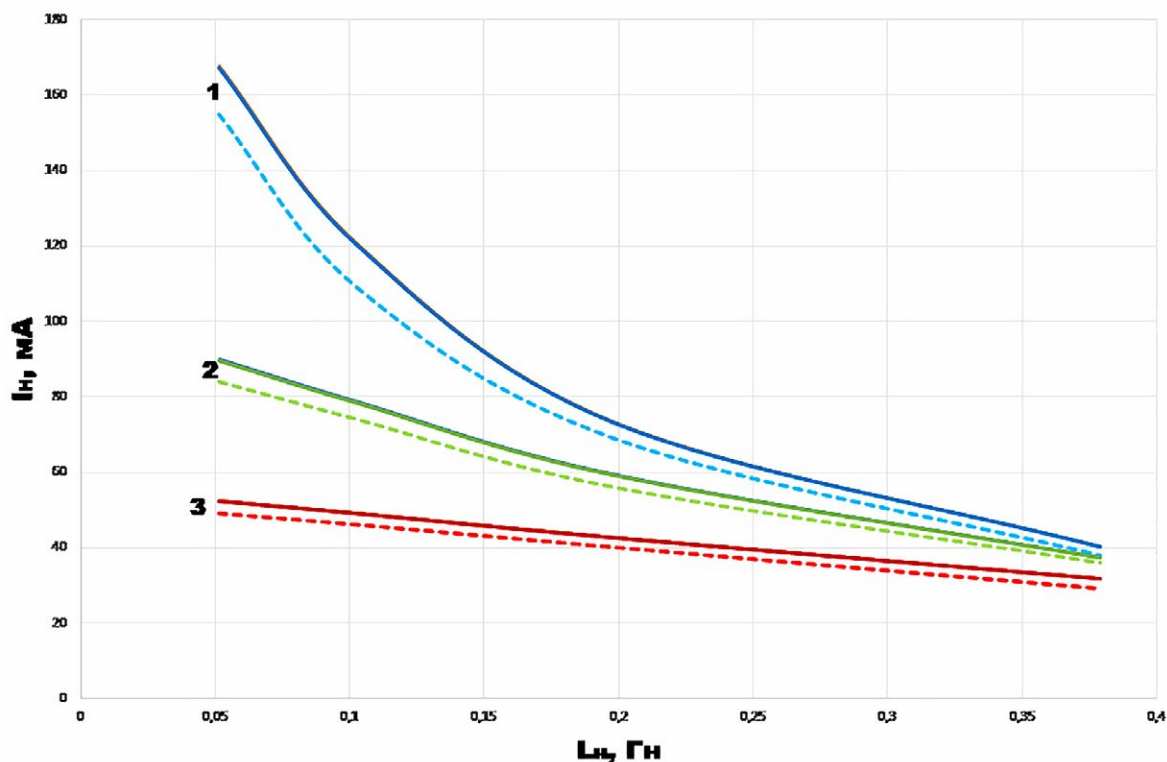


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования и расчетов для действующего значения тока нагрузки (сплошные линии – расчет по гармоникам и выражению (15), штриховые линии – эксперимент): 1 – $R=47 \text{ Ом}$; 2 – $R=107 \text{ Ом}$; 3 – $R=194 \text{ Ом}$

Fig. 2. Results of the experimental study and calculations for the effective value of the load current (solid lines – calculation by harmonics and expression (15), dashed lines – experiment): 1 – $R=47 \text{ Ohm}$; 2 – $R=107 \text{ Ohm}$; 3 – $R=194 \text{ Ohm}$

ВЫВОДЫ

Рассмотрен способ вычисления действующего значения тока нагрузки автономного инвертора напряжения с использованием теории вычетов, не требующий разложения кривой тока в гармонический ряд и последующего его суммирования.

Использование теории вычетов значительно упрощает поиск конечного результата и сокращает объем вычислительной работы.

Справедливость полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями опытного образца однофазного инвертора напряжения.

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. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. М.: Энергия, 1969.
2. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника: Том 2: Электронная преобразовательная техника. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. EDN: XMTHSZ
3. Быльцева В.Д., Изварин М.Ю., Ким К.К. Системы автономного хода городского электрического транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 300-319. doi: 10.17816/transsyst634812 EDN: SONMKY
4. Шаряков В.А., Никитин В.В., Евстафьев А.М., Колпахчян П.Г. К вопросу об оценке энергопотребления подвижным составом городского рельсового транспорта // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 4. С. 120-124. doi: 10.17213/0136-3360-2024-4-120-124 EDN: RQOTLC
5. Карабаджак И.Д., Никитин В.В. Энергообеспечение потребителей переменного тока от батареи водородных топливных элементов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 204, № 1. С. 13-19. EDN: ZMVOCQ
6. Трифонов Б.А., Никитин В.В., Середа Г.Е. Расчет начального напряжения на коммутирующем конденсаторе автономного инвертора. В кн.: Проблемы безопасности и эффективности технических систем: Сборник докладов конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 15 мая 2024 года.

- Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. С. 114-119. EDN: RWOMPG
7. Карабаджак И.Д., Никитин В.В. Варианты структуры автономной электроэнергетической системы с батареей водородных топливных элементов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10, № 1. С. 59-75. doi: 10.17816/transsyst624890 EDN: VJKSUO
 8. Теличенко С.А., Никитин В.В., Колпахчян П.Г. и др. Электромагнитные процессы в универсальном полупроводниковом преобразователе для транспортных бортовых систем хранения электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66, № 4. С. 118-127. doi: 10.17213/0136-3360-2023-4-118-127 EDN: CVYVJX
 9. Мазнев А.С., Калинина А.А., Волов А.В. и др. Улучшение регулировочных свойств электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 1. С. 75-81. doi: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-75-81 EDN: NGPPUF
 10. Петрушин А.Д., Титова Т.С., Никитин В.В., Мазнев А.С. Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми электродвигателями электропоезда // Электротехника. 2021. № 10. С. 10-14. EDN: DZIIEN
 11. Li X., Li D., Chang G., et al. High-Voltage Hybrid IGBT Power Modules for Miniaturization of Rolling Stock Traction Inverters. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2022. Vol. 69, N. 2. P. 1266-1275. EDN: HGQHGO doi: 10.1109/tie.2021.3059544
 12. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973.
 13. Ключко В.К. Прикладная математика для инженеров. М.: КУРС, 2025. EDN: OZNHOH
 14. Морозова В.Д. Теория функций комплексного переменного. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. EDN: WKDFSB
 15. Волковоский Л.И., Лунц Г.Л., Араманович И.Г. Сборник задач по теории функций комплексного переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Физматлит, 2004. EDN: QJNAOH

REFERENCES

1. Bedford B, Hoft R. *Theory of autonomous inverters*. Moscow: Energy, 1969.
2. Burkov A.T. *Electronics and Converter Technology: Vol. 2: Electronic Converter Technology*. Moscow: Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport; 2015. EDN: XMTHSZ
3. Byltseva VD, Izvarin MYu, Kim KK. Systems of autonomous running of urban electric transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):300-319. doi: 10.17816/transsyst634812
4. Sharyakov VA, Nikitin VV, Evstaf'ev AM, Kolpakhchyan PG. On the question of assessing energy consumption by the rolling stock of urban rail transport. *Russian Electromechanics*. 2024;67(4):120-124. doi: 10.17213/0136-3360-2024-4-120-124 EDN: RQOTLC

5. Karabadzhak ID, Nikitin VV. Power supply for ac consumers from a hydrogen fuel cell battery. *Electromechanical matters*. VNIIEM studies. 2025;204(1):13-19. EDN: ZMVOCQ
6. Trifonov BA, Nikitin VV, Sereda GE. Calculation of the initial voltage on the switching capacitor of an autonomous current inverter. In: *Problems of safety and efficiency of technical systems: Collection of reports from a conference with international participation, St. Petersburg, May 15, 2024*. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2024:114-119. EDN: RWOMPG
7. Karabadzhak ID, Nikitin VV. Options for the structure of an autonomous electric power system with a battery of hydrogen fuel cells. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):59-75. doi: 10.17816/transsyst624890
8. Telichenko SA, Nikitin VV, Kolpakhchyan PG. Electromagnetic processes in a universal semiconductor converter for transport on-board electrical energy storage systems. *Russian Electromechanics*. 2023;66(4):118-127. doi: 10.17213/0136-3360-2023-4-118-127 EDN: CVYVJX
9. Maznev AS, Kalinina AA, Volov AV, et al. Improvement of regulating properties of dc electric trains with pulse converters. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;19(1):75-81. doi: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-75-81 EDN: NGPPUF
10. Petrushin AD, Titova TS, Nikitin VV, Maznev AS. Optimal Frequency Control of Electric-Train Asynchronous Traction Motors. *Russian Electrical Engineering*. 2021;92(10):550-554. doi: 10.3103/S106837122110014X EDN: HQFKPR
11. Li X, Li D, Chang G, et al. High-Voltage Hybrid IGBT Power Modules for Miniaturization of Rolling Stock Traction Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;69(2):1266-1275. doi: 10.1109/tie.2021.3059544 EDN: HGQHGO
12. Lavrentev MA, Shabat BV. *Methods of the theory of functions of a complex variable*. Moscow: Science; 1973.
13. Klochko VK. *Applied Mathematics for Engineers*. Moscow: KURS; 2025. EDN: OZNHOG
14. Morozova VD. *Theory of functions of a complex variable*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2008. EDN: WKDFSB
15. Volkovyskij LI, Lunc GL, Aramanovich IG. *Collection of problems on the theory of functions of a complex variable*. Moscow: Fizmatlit; 2004. EDN: QJNAOH

Сведения об авторах

Трифонов Борис Алексеевич, к.т.н., доцент;
eLibrarySPIN: 2262-9246; ORSID: 0000-0002-5816-3473;
E-mail: trifoboba45@gmail.com

Середа Геннадий Евгеньевич, к.т.н., доцент;
eLibrarySPIN: 9682-8744; ORSID: 0000-0003-0754-6682;
E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Information about the authors:

Boris A Trifonov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;

eLibrarySPIN: 2262-9246; ORSID: 0000-0002-5816-3473;

E-mail: trifoboba45@gmail.com

Gennady E. Sereda, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;

eLibrarySPIN: 9682-8744; ORSID: 0000-0003-0754-6682;

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst678377>

© А.А. Кузнецов, А.В. Пономарев

Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель. Статья посвящена проектированию системы мониторинга состояний силовых трансформаторов, которая будет хранить и систематизировать результаты хроматографического анализа растворенных газов и акустического контроля состояния изоляции и выводов силовых трансформаторов.

Материалы и методы. Получение данных о состоянии силового трансформатора предлагается выполнять существующими методами, но для их передачи, хранения и анализа предлагается использовать проектируемую автоматизированную систему, которая работает на базе технологии .NET и системы управления базами данных SQLite.

Результаты. Представлена структура базы данных, алгоритмы получения и обработки диагностических данных, шаблоны формируемых отчетов. Разработана структура интерфейса пользователя системы, а также основной функционал.

Заключение. Разрабатываемая система позволит повысить эффективность управления системой электроснабжения железнодорожного транспорта за счет удобного представления актуальных данных о текущем состоянии контролируемых трансформаторов и динамике его изменения.

Ключевые слова: силовые трансформаторы; диагностика; автоматизированная система; мониторинг состояния; база данных; хроматография; акустический контроль; отчетность.

Как цитировать:

Кузнецов А.А., Пономарев А.В. Проектирование автоматизированной системы мониторинга состояний силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 318–331. doi: 10.17816/transsyst678377

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© **A.A. Kuznetsov, A.V. Ponomarev**

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

DESIGN OF AUTOMATED SYSTEM TO MONITOR POWER TRANSFORMER STATES

AIM. The paper discusses the design of a power transformer monitoring system, which will store and systematize the chromatography of dissolved gases and acoustic control of insulation and terminals of power transformers.

MATERIALS AND METHODS. It is proposed to collect data on power transformer states using existing methods. However, it is proposed to use the designed automated system based on .NET technology and the SQLite database management system to transmit, store, and analyze the data.

RESULTS. The paper presents the database structure, algorithms used to collect and process test data, and templates of the generated reports. The authors developed the structure of the system user interface and basic capabilities.

CONCLUSION. The developed system will improve the control performance of the railway power supply system due to the convenient presentation of relevant data on the current state of the controlled transformers and its changes.

Keywords: power transformers; testing; automated system; state monitoring; database; chromatography; acoustic control; reporting.

To cite this paper:

Kuznetsov AA, Ponomarev AV. Design of Automated System to Monitor Power Transformer States. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):318–331. doi: 10.17816/transsyst678377

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное получение информации о фактическом состоянии силовых трансформаторов является важным условием обеспечения безопасности и эффективности перевозочного процесса [1].

В настоящее время для определения состояния трансформаторов применяются различные методы и по каждому из них формируются свои массивы хранимых данных, что усложняет процесс сопоставления результатов анализа. Поэтому разработка автоматизированной системы, позволяющей собирать, хранить и удобно отображать результаты диагностики состояния трансформатора различными методами является актуальной задачей [2, 3].

Разрабатываемая система должна обладать рядом характеристик:

- надежность хранения собранных данных;
- оперативность получения информации (особенно о снижении ресурса трансформатора) [4, 5];
- высокая информативность, благодаря которой обеспечивается гибкость формируемых отчетов о состоянии контролируемых участков.

Для реализации этих требований необходимо разработать структуру хранения данных, связи между данными [6–8].

СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ

В данной работе для хранения данных предлагается реализовать семь взаимосвязанных таблиц.

Базовая таблица «Трансформаторы» описывает основные параметры контролируемых силовых трансформаторов. По ней можно получать наиболее быстрым способом краткую актуальную информацию о состоянии трансформатора. Данные о принадлежности трансформатора (какой службе ЭЧ принадлежит) и его размещении (на какой тяговой подстанции ЭЧЭ расположен) представлены в таблицах «ЭЧ» и «ЭЧЭ», позволяющих структурировать выводимые данные.

По уникальному полю-ключу «id_Трансформатора» таблица, кратко описывающая состояние трансформатора, связана с таблицами, хранящими данные по всем исследованиям данного трансформатора. Благодаря такой организации хранения данных в любой момент времени оператору становятся доступны следующие динамически формируемые данные:

- дата и результат последнего исследования;
- общее количество измерений за все время;

- Предлагаемая структура базы данных представлена на Рис. 1.



ХАРГ – хроматографический анализ растворенных газов

Fig. 1. Proposed database structure

Пример отображения информации в главном окне проектируемой системы мониторинга состояний силовых трансформаторов, реализованный на платформе .NET, приведен на Рис. 2 [9–11].

В верхней части окна выпадающими списками представлена краткая информация об имеющихся трансформаторах, результаты их последних проверок и запланированные даты последующих проверок. Внизу окна

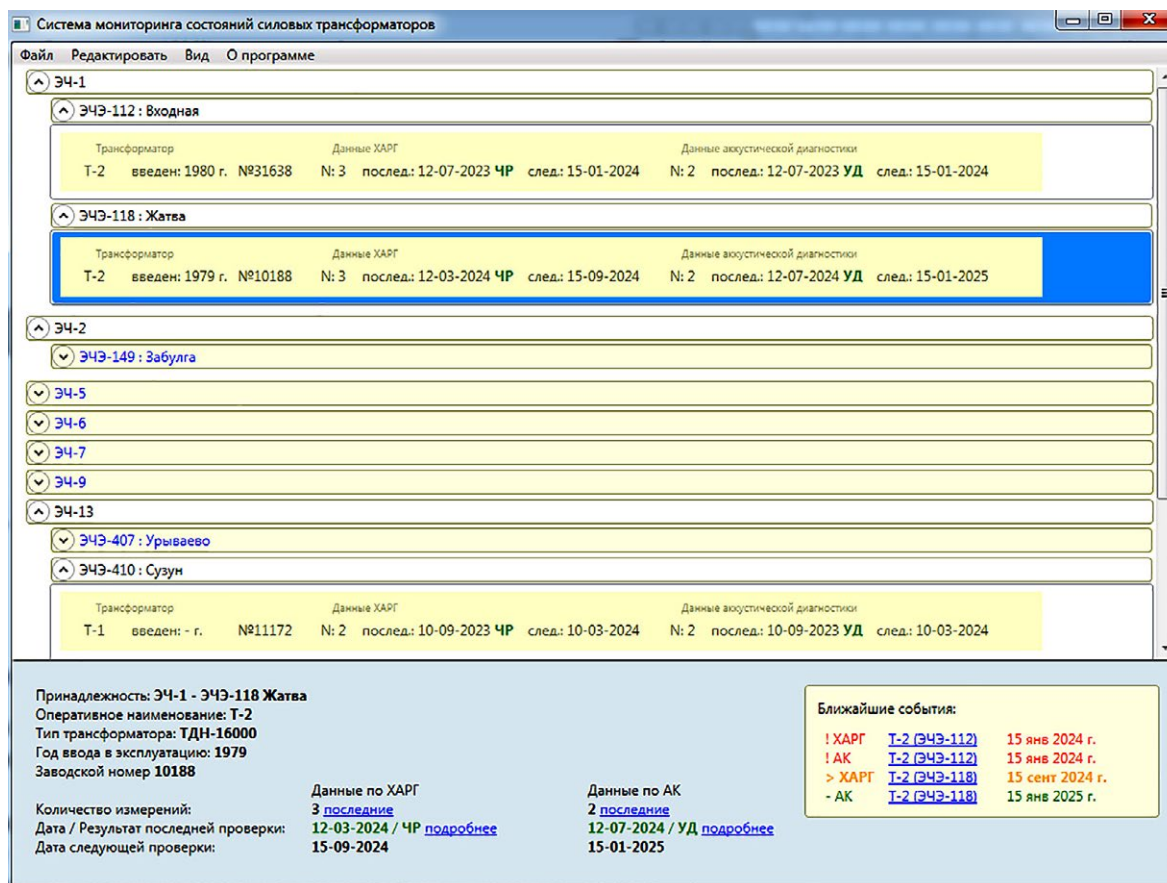


Рис. 2. Главное окно системы мониторинга состояний силовых трансформаторов

Fig. 2. Main window of the system for monitoring the state of power transformers

отображается более подробная информация о конкретном выбранном трансформаторе. Также имеется возможность наблюдать ближайшие запланированные даты проверок по всей базе данных трансформаторов.

При отображении более подробной информации о конкретном силовом трансформаторе имеется возможность отобразить подробные результаты последнего исследования, либо увидеть результаты множества последних измерений, что позволяет отследить динамику изменения тех или иных контролируемых параметров. Примеры таких отчетов приведены ниже.

С целью повышения надежности решение о ресурсном состоянии силового трансформатора предлагается принимать по итогам двух исследований:

- хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в масле;
- акустический контроль (АК) состояния изоляции и вводов силового трансформатора.

ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В МАСЛЕ

ХАРГ позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях появления, определять их вид и степень развития [12, 13]. Для выполнения диагностики требуется произвести отбор масла, что в свою очередь требует отключения питания трансформатора и приводит к перерывам в работе участков контактной сети, и доставить образец в дорожную химико-техническую лабораторию (ДХТЛ).

В результате анализа выявляются количественные характеристики примесей и сравниваются с граничными значениями для данного типа трансформаторов. Полученные данные отправляются в дорожную электротехническую лабораторию (ДЭЛ) и вводятся в предлагаемую базу данных. Передача данных может быть осуществлена удаленно по радиоканалу или имеющимся кабельным линиям связи, но сама процедура анализа занимает в среднем около одного месяца и проводится не реже одного раза в полугодие. Однако при появлении критических значений контролируемых

Принадлежность:	ЭЧ-1, ЭЧЭ-118 Жатва	
Оперативное наименование:	Т-2	
Тип трансформатора:	ТДН-16000	
Год ввода в эксплуатацию:	1979	
Заводской номер:	10188	
Дата отбора пробы:	12.03.2024	
Результат диагностики:	Частичные разряды	
Дата следующего отбора:	15.09.2024	
Наличие газа	Граничная концентрация	Фактический результат
Двуокись углерода (CO ₂): пл / без пл	0,400 / 0,800	0,05809
Метан (CH ₄)	0,01	0,00371
Этан (C ₂ H ₆)	0,005	0,00036
Этилен (C ₂ H ₄)	0,01	0,00034
Ацетилен (C ₂ H ₂)	0,001	0,00047
Оксид углерода (CO)	0,05	0,000787
Водород (H ₂)	0,01	0,02703
Кислород (O ₂)	-	6,56028
Азот (N)	-	15,09557
Влагосодержание	25 г/т	
Горючие газы	0,05	

Рис. 3. Пример подробного представления результата ХАРГ

Fig. 3. Sample of chromatography analysis results detailed representation

параметров сроки проверки могут быть существенно сокращены вплоть до двух недель.

В базе данных предлагается хранить данные ХАРГ-исследований по каждому трансформатору для получения истории изменения диагностических параметров и более обоснованного определения даты следующей проверки. Предлагаемая дата следующей проверки как итог диагностики по ХАРГ хранится в таблице «Измерения ХАРГ» для каждого измерения. Но фактическое планирование и утверждение даты следующей проверки по ХАРГ с учетом множества внешних факторов будет выполнять оператор разрабатываемой системы, и эта дата хранится в таблице «Трансформаторы» и позволяет реализовывать удобные сигнализирующие события в системе.

Пример подробного представления одиночного результата ХАРГ приведен на Рис. 3, а отображение нескольких результатов в динамике – на Рис. 4.

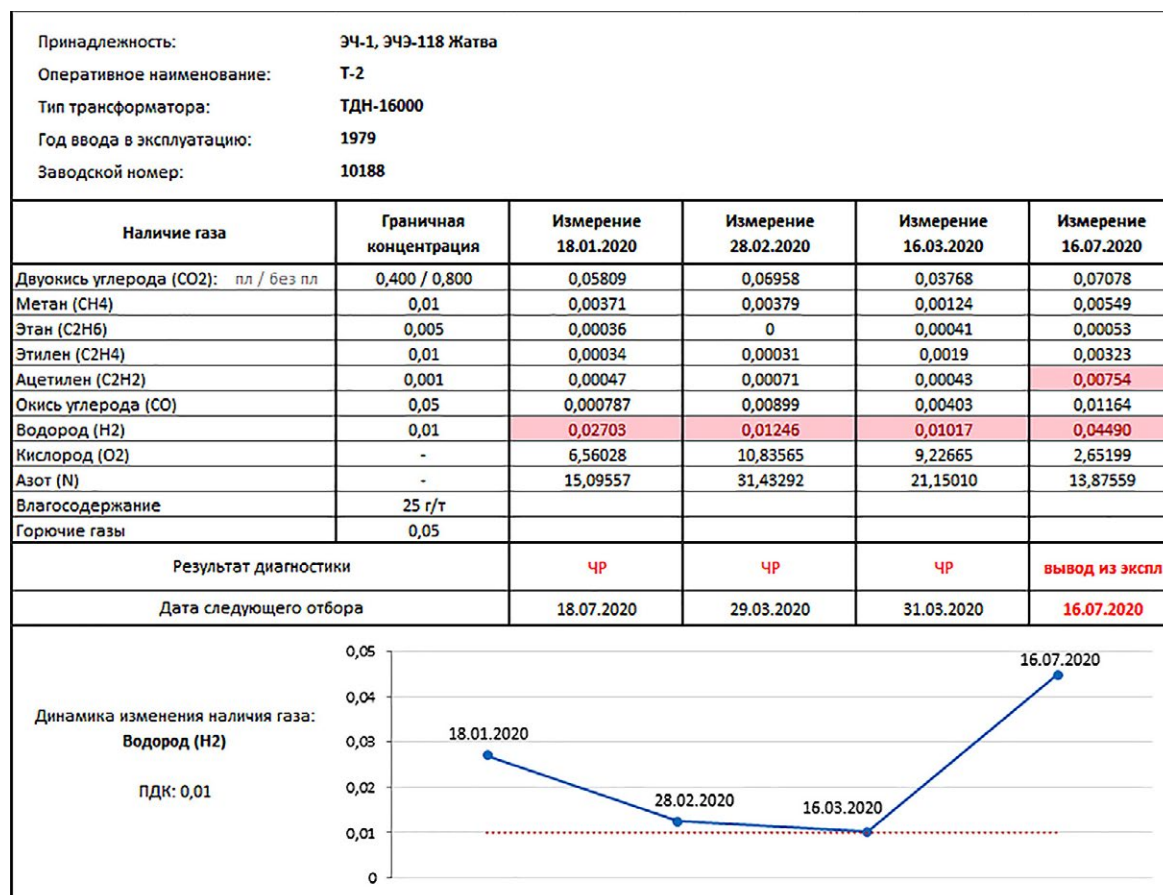


Рис. 4. Пример представления результатов ХАРГ в динамике

Fig. 4. Sample of dynamic chromatography analysis results representation

Результатами диагностики могут быть различные выявленные дефекты: частичные разряды (ЧР), дуговые разряды (ДР), повреждение твердой изоляции (ПТИ), межвитковые замыкания (МВЗ) и другие. Наличие и степень выраженности этих дефектов определяют следующую дату проверки.

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ВВОДОВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вторым способом мониторинга состояния силовых трансформаторов является применение акустической системы контроля состояния изоляции и вводов трансформаторов [14, 15]. В этом случае к поверхности бака высоковольтного трансформатора при помощи магнитов крепится некоторое количество акустических датчиков. Каждый из них фиксирует акустические колебания, возникающие на стенках бака из-за появления частичных разрядов (ЧР) в обмотках трансформатора. Одновременная фиксация колебаний несколькими датчиками, расположенными в различных местах поверхности позволяет:

- получать более четкий и мощный сигнал на датчике, наиболее близком к источнику ЧР;
- определять координаты источника ЧР расчетным путем по данным нескольких датчиков.

Полученная информация может напрямую передаваться в ДЭЛ и вноситься в базу данных. Однако объем передаваемых данных будет необоснованно велик, поэтому в настоящей системе предлагается использовать предварительную обработку полученных данных:

- данные со всех датчиков сохраняются на жестком диске (путь к данным фиксируется в базе данных) и проходят предварительную обработку (определяются средние значения амплитуд сигналов, количество зафиксированных событий);
- из всех датчиков выбирается тот, который фиксирует данные с наибольшей амплитудой;
- в базе данных фиксируется положение выбранного датчика;
- сигналы с выбранного датчика обрабатываются на основе математического аппарата рядов Фурье и вейвлет-анализа. Полученные спектры, скейлограммы и усредненный сигнал с выбранного датчика также фиксируются в базе данных;

- полученный усредненный сигнал сравнивается с эталонами различных дефектов, в результате чего формируется решение о ресурсном состоянии изоляции силового трансформатора и предлагаемой даты следующей проверки.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для предварительной обработки полученных данных реализуется соответствующий программный модуль [16], графическая схема алгоритма (ГСА) работы которого укрупненно представлена на Рис. 5. Подзадача «Обработка сигналов четырех каналов» представлена на Рис. 6. Итогом работы модуля будут данные, подготовленные для передачи на сервер и сохранения в базе данных.

Таким образом, в базе данных всегда будет наиболее востребованная и актуальная информация, включающая в себя положение наиболее подходящего датчика, результат анализа и предлагаемую дату следующей проверки. В связанной таблице будут представлены сам (усредненный) сигнал и результаты его обработки (спектры, скейлограммы), статистические характеристики и ссылка на хранилище данных со всех оставшихся датчиков.

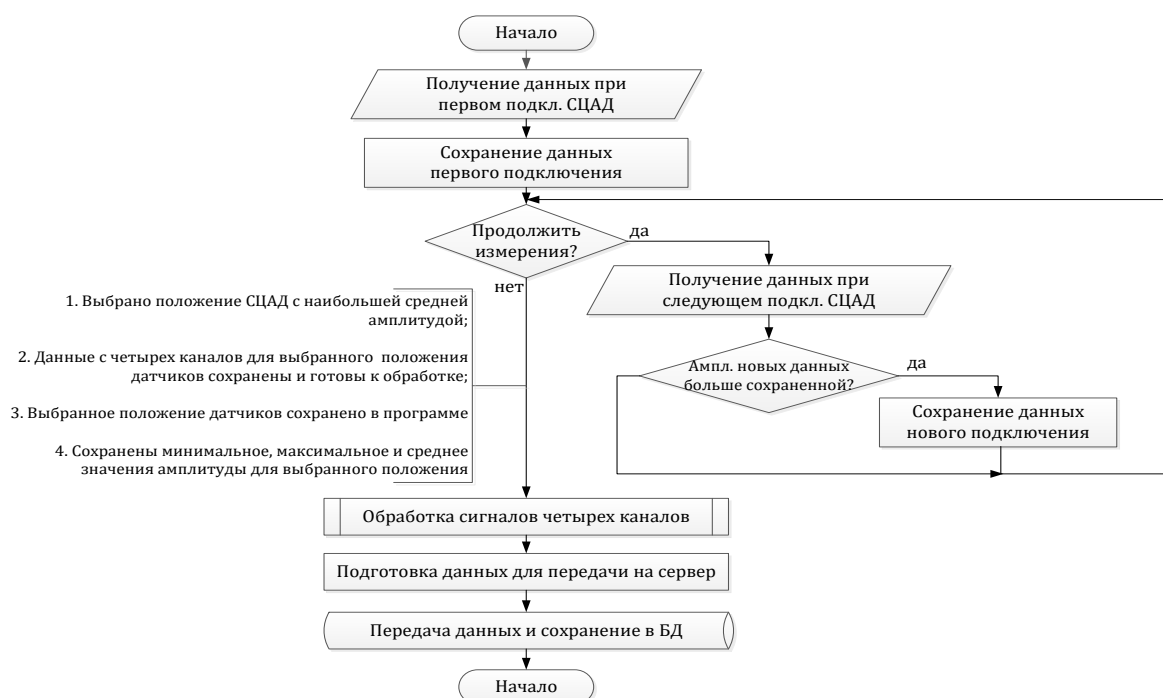


Рис. 5. ГСА работы модуля предварительной обработки акустических данных

Fig. 5. Diagram of acoustic data preprocessing module algorithm



Рис. 6. ГСА обработки сигналов акустических датчиков при выбранном расположении

Fig. 6. Processing algorithm diagram for signals from selected position of acoustic sensors

Сама передача данных в ДЭЛ может быть выполнена непосредственно от трансформатора при помощи переносной системы цифровой акустической диагностики (СЦАД) по радиоканалу или соответствующей линии связи.

Диагностику с использованием АК предлагается также выполнять через определенные временные интервалы (в среднем один раз в полгода).

Пример представления результатов акустического контроля в базе данных представлен на Рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В итоге получилось сформировать основную структуру и логику работы проектируемой автоматизированной системы мониторинга

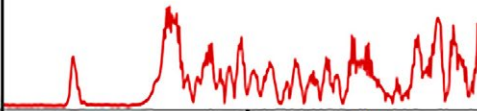
Принадлежность:	ЭЧ-1, ЭЧЭ-118 Жатва	
Оперативное наименование:	Т-2	
Тип трансформатора:	ТДН-16000	
Год ввода в эксплуатацию:	1979 (тех.обсл. 2020)	
Заводской номер:	10188	
Дата проведения АК:	12.03.2024	
Положение датчиков:	Со стороны пути, верх, центр	
Результат АК:	Частичные разряды	
Критичность дефекта:	25%	
Ответственный оператор:	Иванов И. И.	
Дата следующего отбора:	15.09.2024	
Параметр	Ед. измерения	Значение
Количество событий	шт	72
Длительность измерения	сек	30
Частота	событий / сек	2,40
Минимальная амплитуда	ед. АЦП	170
Средняя амплитуда	ед. АЦП	420
Максимальная амплитуда	ед. АЦП	1540
Усредненный временной срез скейлограммы вейвлет-преобразования		
Совпадение с эталоном	пробой изоляции	60%
Детальные изображения:	средний сигнал	открыть
	спектр Фурье	открыть
Файл данных	\\LocalStorage\240312_10188_a1.zip	

Рис. 7. Пример представления результата акустического контроля

Fig. 7. Sample of acoustic analysis results representation

состояний силовых трансформаторов; определить структуру базы данных и формируемых на ее основании отчетов.

ВЫВОДЫ

Разрабатываемая система позволит более оперативно отслеживать возникновение критических состояний диагностируемых трансформаторов, принимать обоснованные решения на основе актуальной информации о текущем состоянии контролируемых трансформаторов и о динамике изменения их состояния.

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. 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
2. Патент РФ на изобретение № 2779269 / 05.09.22. Бюл. №25. Волчанина М.А., Горлов А.В., Еркебаев А.Ж., Кузнецов А.А. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. EDN: FJZXPX
3. Патент РФ на изобретение № 2615790 / 11.04.17. Бюл. № 11. Храмшин В.Р., Карандаев А.С., Храмшин Р.Р., и др. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов. EDN: ATZCEC
4. Вдовико В.П. Характеристики частичных разрядов и их применение в оценке качества электрической изоляции высоковольтного оборудования // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 5. С. 23-26. EDN: KRRWJT
5. Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. № 15. С. 1576-1583. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
6. Шубочкина М.Р. Анализ современных СУБД в контексте общемировых тенденций. В кн.: Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы»; Апрель 1, 2024. Орел, 2024. С. 225-232.
7. Рыбальченко Д.И., Сухоруков С.С. Выбор реляционной системы управления базами данных для проекта В кн.: Международная научно-практическая конференция «Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки»; Май 17, 2023. Москва, 2023. С. 67-68.
8. Валеева Л.С. Сравнительный анализ SQL и NOSQL баз данных // Региональная студенческая научно-практическая конференция «Молодые нефтяники»; Апрель 18, 2024. Альметьевск, 2024. С. 129-130.
9. Тюкачев Н.А., Хлебостроев В.Г. С#. Алгоритмы и структуры данных. Санкт-Петербург: Лань, 2023.
10. Унгер А.Ю. Паттерны проектирования на C++. Москва: РТУ МИРЭА, 2023.

11. Рихтер Д. CLR via C#: Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. Санкт-Петербург: Питер, 2019.
12. Виноградов Л.В., Игнатьев Е.Б., Овсянников Г.В., Попов Г.В. Хроматографический анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2013.
13. Давиденко И.В., Овчинников К.В. Идентификация дефектов трансформаторов по анализу газов, растворенных в масле // Электротехника. 2019. № 4. С. 48-54. EDN: NUQRAM
14. Taha I.B.M., Dessouky S.S., Ghaly R.N.R., Ghoneim S.S.M. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. P. 4759-4769.
15. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., et al. Monitoring the technical condition of power transformers using acoustic diagnostics // South Ural State University Bulletin. 2008. Vol. 26. P. 26-31.
16. Гресова А.С., Селедцова А.М. ВПФ технологии в разработке программных решений. В кн.: Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технологии: исследования, разработки и их использование в комплексной подготовке специалистов»; Апрель 22–26, 2024. Невинномысск, 2024. С. 182-188.

REFERENCES

1. Cheremisin VT, Kuznetsov 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
2. Patent RUS № 2779269/ 05.09.22. Byul. №25. Volchanina MA, Gorlov AV, Erkebaev AZh, Kuznetsov AA. *Ustrojstvo dlja monitoringa silovyh transformatorov*. (In Russ.) EDN: FJZXPX
3. Patent RUS № 2615790/ 11.04.17. Byul. № 11. Hramshin VR, Karandaev AS, Hramshin RR, et al. *Ustrojstvo dlja monitoringa silovyh transformatorov*. (In Russ.) EDN: ATZCEC
4. Vdoviko VP. Kharakteristiki chastichnykh razryadov i ikh primenenie v otsenke kachestva elektricheskoi izolyatsii vysokovoltnogo oborudovaniya. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost*. 2005;5:23-26. (In Russ.) EDN: ATZCEC
5. Markalous SM, Tenbohlen S, Feser K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008;15:1576-1583. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712660
6. Shubochkina MR. Analysis of modern DBMS in the context of global trends. In: *Proceedings of the Russian science conference « Tsifrovyye instrumenty obespecheniya ustoychivogo razvitiya ekonomiki i obrazovaniya: novyye podkhody i aktual'nyye problemy»*; 2024 Apr 1. Orel; 2024:225-232. (In Russ.)

7. Rybal'chenko DI, Sukhorukov SS. Selecting a Relational Database Management System for a Project. In: *Proceedings of the international science conference «Issledovaniye razlichnykh napravleniy sovremennoy nauki: yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki»*; 2023 May 17. Moscow; 2023:67-68. (In Russ.)
8. Valeyeva LS. Comparative analysis of SKL and NOSYAL databases. In: *Proceedings of the regional student scientific and practical conference “Molodyye neftyaniki”*; 2024 Apr 18. Al'met'yevsk; 2024:129-130. (In Russ.)
9. Tyukachev NA, Khlebostroyev VG. C#. *Algorithms and data structures*. St. Petersburg: Lan; 2023. (In Russ.)
10. Unger AYU. *Design Patterns on C++*. Moscow: RTU MIREA; 2023. (In Russ.)
11. Rihter D. *CLR via C#: Programming on the platform Microsoft.NET Framework 4.5 in language C#*. St. Petersburg: Piter; 2019. (In Russ.)
12. Vinogradov LV, Ignat'yev YeB, Ovsyannikov GV, Popov GV. *Chromatographic analysis of dissolved gases in transformer diagnostics*. Ivanovo: IGEU im VI Lenina; 2013. (In Russ.)
13. Davidenko IV, Ovchinnikov KV. Identification of Transformer Defects via Analyzing Gases Dissolved in Oil. *Elektrotehnika*. 2019;4:48-54. (In Russ.) EDN: NUQRAM
14. Taha IBM, Dessouky SS, Ghaly RNR, Ghoneim SSM. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements. *Alexandria Engineering Journal*. 2020;59: 4759-4769.
15. Karandaev AS, Evdokimov SA, Karandaeva OI, et al. Monitoring the technical condition of power transformers using acoustic diagnostics. *South Ural State University Bulletin*. 2008;26:26-31.
16. Gresova AS, Seledtsova AM. VPF technologies in the development of software solutions. In: *Proceedings of the international scientific and practical conference “Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: issledovaniya, razrabotki i ikh ispol'zovaniye v kompleksnoy podgotovke spetsialistov”*; 2024 Apr 22-26. Nevinnomyssk; 2024:182-188. (In Russ.)

Сведения об авторах:

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

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

Information about the authors:

Andrey A. Kuznetsov, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
eLibrary SPIN: 5259-0531; ORCID: 0000-0002-1815-4679;
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

Anton V. Ponomarev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
eLibrary SPIN: 8927-5050; ORCID: 0000-0003-1468-5402
E-mail: antonyswork@gmail.com

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

<https://doi.org/10.17816/transsyst683380>

© И.В. Мартиросян, А.С. Стариковский, М.В. Балакина,
С.В. Покровский

Национальный Исследовательский Ядерный Университет
(Москва, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО-ЛЕВИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ СТОПОК КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ

Цель. Определение оптимальной конфигурации магнитного поля, обеспечивающей масштабируемость и высокие нагрузочные характеристики опорного ВТСП подшипника

Материалы и методы. Численный анализ ВТСП подшипников выполнен в среде моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. Получены распределения магнитного поля для различных конфигураций магнитных сборок ВТСП подшипника, рассмотрены кольцевой магнит, кубические магниты и секториальные постоянные магниты. Для различных геометрий ВТСП подшипников получены вертикальные и латеральные нагрузочные кривые.

Заключение. Установлено, что для достижения наиболее высокой стабильности и несущей способности сверхпроводящего подшипника при сохранении возможности масштабирования оптимальным является использование секториальных постоянных магнитов с магнитопроводом.

Ключевые слова: сверхпроводящий опорный подшипник; ВТСП композиты; численное моделирование.

Как цитировать:

Мартиросян И.В., Стариковский А.С., Балакина М.В., Покровский С.В. Моделирование магнито-левитационных характеристик опорного магнитного подшипника на основе стопок композитных ВТСП лент // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 332–347. doi: 10.17816/transsyst683380

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, A.S. Starikovskii, M.V. Balakina, S.V. Pokrovskii

National research nuclear university

(Moscow, Russia)

**MAGNETIC LEVITATION MODELING
OF SUPPORT MAGNETIC BEARING BASED ON STACKS
OF COMPOSITE HTS TAPES**

AIM. To determine the optimal magnetic field configuration ensuring scalability and high load on the support HTS bearing.

MATERIALS AND METHODS. Numerical analysis of HTS bearings was performed in Comsol Multiphysics modeling environment.

RESULTS. The authors determined magnetic field distributions for various configurations of magnetic HTS bearing assemblies, including a ring magnet, cubic magnets, and sectorial permanent magnets. The authors determined vertical and lateral load curves for different shapes of HTS bearings.

CONCLUSION. It was found that sectorial permanent magnets with a magnetic circuit is the optimal solution to achieve the highest stability and load-bearing capacity of a superconducting bearing while maintaining the scalability.

Keywords: superconducting support bearing; HTS composites; numerical modeling.

To cite this paper:

Martirosian IV, Starikovskii AS, Balakina MV, Pokrovskii SV. Magnetic Levitation Modeling of Support Magnetic Bearing Based on Stacks of Composite HTS Tapes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):332–347. doi: 10.17816/transsyst683380

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящие магнитные подшипники (СМП), работающие на основе явления магнитной левитации, находят широкое применение в различных областях науки и техники, таких как кинетические накопители энергии [1, 2], транспортные системы [3, 4] и высокоточные прецизионные механизмы [5–7]. Уникальные преимущества СМП заключаются в хороших нагрузочных характеристиках, высокой устойчивости и стабильности, долговечности, способности обеспечивать бесконтактное вращение, а, следовательно, и в полном отсутствии потерь на трение. В настоящее время такие системы наиболее часто реализуются с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые благодаря своим высоким критическим характеристикам в магнитных полях позволяют создавать эффективные магнитные системы, не требующие активного управления [8–10]. Одним из перспективных конструкционных материалов, выступающих в качестве ВТСП элемента опорных ВТСП подшипников, является сверхпроводник на основе соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (далее YBCO), наиболее часто представленный в виде объемной ВТСП керамики [11–13] или композитных ВТСП лент [14, 15]. Последние обладают хорошими механическими свойствами, гибкостью и высокой термостабильностью в сравнении с традиционными сверхпроводящими материалами [16, 17], что обусловило релевантность их применения в высокоскоростных наземных транспортных системах и высокооборотных магнитных подшипниках, подверженных механическим нагрузкам.

Промышленные ВТСП композиты в виде лент на гибкой подложке широко используются в качестве активного элемента в конструкциях магнитных подшипников, где их часто комбинируют с постоянными магнитами (ПМ) для создания стабильного и однородного магнитного поля в выделенном направлении. В качестве источника магнитного поля эффективно применяются цилиндрические или кольцевые постоянные магниты. Однако, масштабирование систем на основе таких ПМ ограничено технологическими сложностями изготовления и высокой стоимостью производства крупных кольцевых магнитов. В связи с этим возникает необходимость исследования альтернативных конфигураций внешнего магнитного поля, которые могли бы обеспечить сравнимые или улучшенные характеристики опорного ВТСП подшипника.

Целью настоящего исследования является анализ магнито-силовых, левитационных и энергетических характеристик различных

конфигураций магнитных подшипников с использованием ВТСП лент и постоянных магнитов. В качестве источников внешнего магнитного поля рассматриваются кольцевые магниты, кубические магниты и секториальные магниты, а также конфигурации с магнитопроводом. Особое внимание уделено численному моделированию и сравнению различных геометрий ВТСП подшипников, что позволяет не только прогнозировать и анализировать различия в магнитных и энергетических характеристиках для конфигураций магнитного основания СМП, но и оценить потенциал применимости тех или иных конфигураций в масштабируемых сверхпроводящих системах.

КОНФИГУРАЦИИ ОПОРНОГО ВТСП ПОДШИПНИКА

Базовая геометрия опорного сверхпроводящего подшипника с кольцевым постоянным магнитом приведена на Рис. 1. В данной конфигурации магнитный подшипник представляет собой систему, состоящую из статора в виде кольцевого постоянного магнита внутреннего радиуса 25 мм, ширины и высоты 10 мм и ротора в виде стопок композитных ВТСП лент, уложенных в форме многоугольника над поверхностью постоянного магнита. В качестве прототипа сверхпроводящих элементов ротора использованы промышленные ВТСП ленты YBCO ширины 12 мм и толщины 0,1 мм производства российской компании SuperOx [18]. Длинномерная ВТСП лента для реализации ротора разрезается на фрагменты трапецевидной формы, которые укладываются друг на друга, формируя стопки ВТСП лент. Полученные таким образом стопки лент выкладываются над кольцевым постоянным магнитом так, что центр вписанной в полученный многоугольник окружности и центр кольцевого ПМ лежат на оси вращения. Количество ВТСП лент в каждой стопке ротора опорного подшипника составляет 20, так что суммарная толщина ВТСП элемента составляет 2 мм. Минимальная величина левитационного зазора между стопками ВТСП лент и магнитным основанием составляет 7 мм. В каждом из рассмотренных случаев ПМ намагничены вдоль вертикальной оси z .

Преимущество базовой конфигурации опорного ВТСП подшипника заключается в высокой однородности магнитного поля при изменении углового положения сверхпроводящих элементов. Основным недостатком данной системы является сложность ее масштабирования в связи с технологическими трудностями, связанными, в частности, с изготовлением крупных кольцевых постоянных магнитов. Этот факт

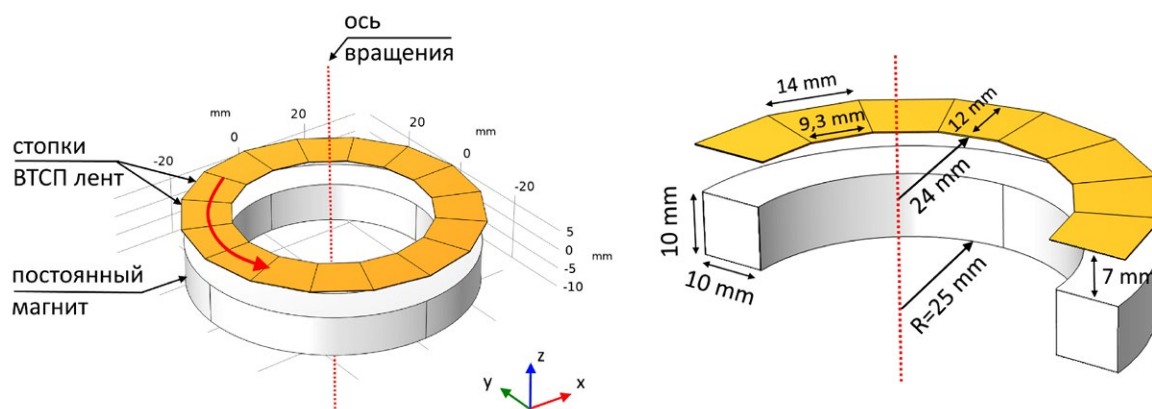


Рис. 1. Базовая геометрия опорного ВТСП подшипника с кольцевым постоянным магнитом (слева) и сечение магнитной системы с геометрическими размерами (справа)

Fig. 1. Basic geometry of a support HTS bearing with a ring permanent magnet (left) and a cross-section of the magnetic system with geometric dimensions (right)

ограничивает возможности применения данного типа подшипников в крупномасштабных магнитных системах и делает необходимым поиск альтернативных магнитных конфигураций, обеспечивающих сопоставимые характеристики подшипника при меньших технологических затратах.

Наиболее доступным способом разработки масштабируемого опорного ВТСП подшипника является использование в качестве магнитного основания широко распространенных и коммерчески доступных кубических постоянных магнитов. Другой перспективной альтернативой является использование секторов постоянных магнитов, из которых можно выложить кольцевую структуру. На Рис. 2 приведены альтернативные конфигурации магнитного основания опорного ВТСП подшипника, рассматриваемые в настоящей работе. В случае кубических и секториальных магнитов радиус центра окружности, вписанной в магнитное основание, аналогично кольцевому ПМ, составляет 25 мм, а высота магнитов – 10 мм. В рамках исследования дополнительно рассматривается оптимизированная конфигурация магнитной системы, где кольцевой магнитопровод, расположенный под массивом кубических или секториальных магнитов, обеспечивает замыкание магнитного потока снизу и перераспределение его плотности. Ширина кольца магнитопровода соответствует ширине магнитов, а его толщина рассматривается как варьируемый параметр и изменяется при моделировании от нуля

(отсутствие магнитопровода) до 20 мм, что позволяет исследовать эффекты влияния геометрии магнитопровода на левитационные характеристики системы.

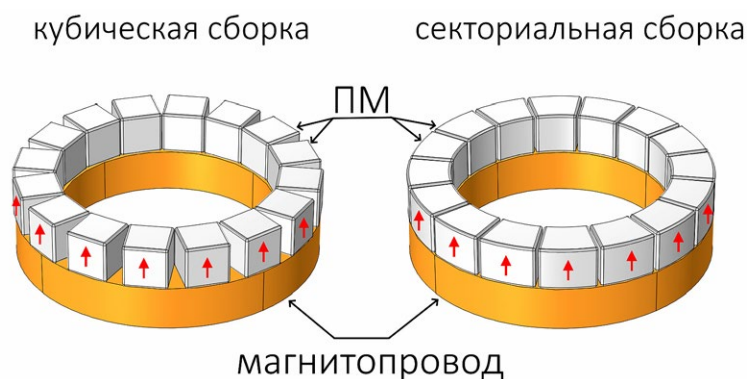


Рис. 2. Конфигурации магнитного основания опорного ВТСП подшипника: слева – кубические постоянные магниты; справа – секториальные постоянные магниты; красными стрелками обозначено направление намагниченности ПМ

Fig. 2. Configurations of the magnetic base of the HTS bearing: on the left – cubic permanent magnets; on the right – sectorial permanent magnets; the red arrows indicate the direction of magnetization of the PM

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Моделирование магнито-силовых характеристик опорного ВТСП подшипника выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Решение задачи выполняется с использованием формулировки нестационарных уравнений Максвелла в терминах компонент напряженности магнитного поля (Н-формализм). Разработанная модель ранее применялась для численного анализа простой левитационной системы на основе стопок ВТСП лент, подробное описание численной модели приведено в работе [19]. В качестве основного материального уравнения системы используется степенной закон для нелинейной вольтамперной характеристики сверхпроводника:

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n, \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля, E_c – критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J – плотность тока, J_c – величина критической плотности тока YBCO, n – показатель степени, равный для используемых образцов 26.

Плотность тока J в сверхпроводнике определяется на основе решения нестационарных уравнений Максвелла, а критическая плотность тока J_c зависит от величины магнитного поля B и температуры T , как:

$$J_c(B, T) = L(B, T) \cdot J_{c0} \quad (2)$$

где $L(B, T)$ – лифт-фактор критического тока, J_{c0} – плотность критического тока ВТСП лент в собственном поле при температуре кипения жидкого азота 77,4 К. Экспериментально измеренное значение критического тока для контрольных образцов ВТСП лент SuperOx составило 500 А. Поверхность для лифт-фактора $L(B, T)$ критического тока образцов в диапазоне температур от 15 К до 92 К во внешнем магнитном поле амплитуды до 8 Тл вводится в виде интерполяции экспериментальных данных для точного учета температурной и полевой зависимости критического тока ВТСП элементов [18].

В качестве прототипа постоянных магнитов для реализации магнитного основания статора в каждом случае использованы NdFeB магниты марки N42. В качестве материала магнитопровода применяется магнитомягкое железо с индукцией насыщения 2,3 Тл. При моделировании сверхпроводящих лент используется метод гомогенизации, позволяющий избежать явного учета слоистой архитектуры ВТСП композитов без существенной потери точности вычислений [20]. Намагничивание ВТСП элементов в составе опорного магнитного подшипника выполняется в режиме охлаждения в нулевом внешнем магнитном поле (ZFC). При этом ВТСП элементы, предварительно охлажденные до температуры 77,4 К, приближаются с высоты 60 мм до высоты 7 мм от поверхности магнитного основания, после чего ротор приводится во вращение с частотой 2 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование магнито-силовых характеристик опорного ВТСП подшипника было выполнено для различных конфигураций блока магнитного основания, а именно для кольцевого ПМ, кольцевых сборок кубических и секториальных ПМ (Рис. 1), а также сборок кубических и секториальных ПМ, уложенных на кольцо магнитопровода. При этом ширина магнитопровода равняется ширине постоянных магнитов, а его высота варьировалась от 1 мм до 20 мм. В процессе проведения численного анализа было установлено, что при использовании магнитопровода максимальный прирост силы левитации в опорном

подшипнике (как для кубической, так и для секториальной конфигураций) наблюдается для высоты магнитопровода 10 мм, т.е. высоты, равной высоте одного постоянного магнита. При уменьшении толщины магнитопровода наблюдается ухудшение опорной функции подшипника, тогда как увеличение толщины не приводит к значимому приросту силы левитации.

На Рис. 3 приведены зависимости силы магнито-левитационного взаимодействия от величины левитационного зазора для ВТСП подшипников с различными видами блока магнитного основания.

Наименьшие нагрузочные характеристики СМП достигаются при использовании кубических магнитов (на 12% ниже, чем для кольцевого ПМ). Однако при дополнении конструкции магнитопроводом опорная способность такого подшипника становится сопоставима с СМП на основе секториальной сборки ПМ. Наибольшая величина силы магнитной

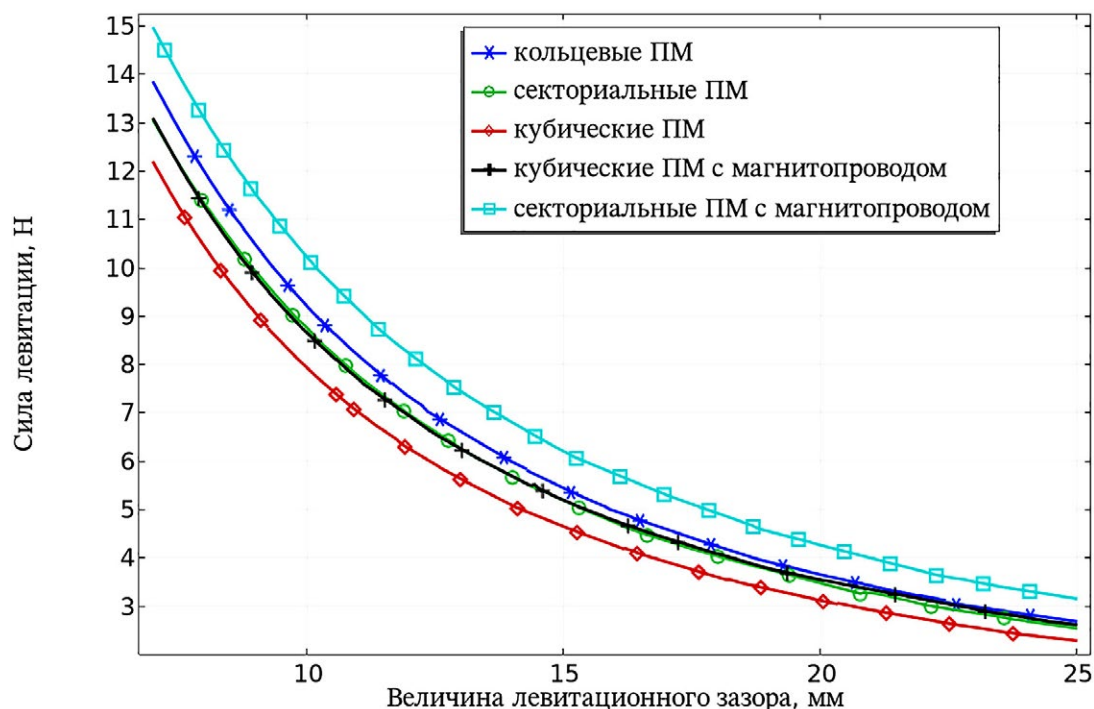


Рис. 3. Зависимости силы левитации от величины магнитолевитационного зазора между стопками ВТСП лент и магнитным основанием подшипника для различных конфигураций блока магнитного основания; высота кольца магнитопровода составляет 10 мм

Fig. 3. Dependences of the levitation force on the size of the magnetic levitation gap between the stacks of HTSC tapes and the magnetic base of the bearing for various configurations of the magnetic base block; the height of the magnetic circuit ring is 10 mm

левитации была достигнута при использовании в качестве магнитного основания секториальной сборки ПМ с магнитопроводом. Максимальная сила левитации в такой геометрии оказалась на $\sim 8\%$ выше, чем в эталонной конфигурации СМП с кольцевым магнитом. Более того, использование магнитопровода в комбинации с секториальными постоянными магнитами приводит к тому, что вертикальная составляющая силы левитации такого СМП при любой из исследованных толщин магнитопровода (от 1 мм до 20 мм) выше, чем для эталонной конфигурации с кольцевым магнитом.

Для оценки потенциала использования различных конфигураций магнитного основания в масштабируемых сверхпроводящих системах был проведен расчет энергетических потерь в ВТСП элементе подшипника при вращении ротора с частотой 2 Гц (Рис. 4). Использование альтернативных конфигураций блока магнитного основания приводит к росту энергетических потерь на порядок в сравнении с геометрией на основе кольцевого ПМ. Кроме того, хорошо видно, что применение конфигураций с магнитопроводом приводит к значительному росту потерь в системе, что связано не только с увеличением внешнего магнитного поля, но и наблюдаемым ростом неоднородности магнитного поля и его влиянием на эффекты перемагничивания в ВТСП материале. Например, количество потерь на цикл для секториальной геометрии магнитного основания оказалось в $\sim 2,5$ раза ниже, нежели в аналогичной конфигурации с магнитопроводом высоты 10 мм. Вместе с тем, прирост силы левитации при использовании магнитопровода в этой конфигурации составил всего 14% (Рис. 3). Полученный результат свидетельствует о том, что релевантность применения секториальных ПМ с магнитопроводом может быть достигнута при масштабировании ВТСП подшипника путем увеличения его радиуса вместе с количеством ПМ или же добавления количества ВТСП лент в стопках (Рис. 5). При этом при увеличении радиуса СМП и количества ПМ сила левитации в системе возрастает линейно при том же количестве ВТСП лент в стопке.

Стоит также отметить, что величины энергетических потерь при использовании секториальных ПМ с магнитопроводом сопоставимы с величиной потерь при использовании кубических постоянных магнитов без магнитопровода. В связи с этим, применение кубических магнитов может быть рекомендовано для сравнительно простых магнитных систем, поскольку такие магниты широко распространены, коммерчески доступны и обеспечивают упрощение производства и сборки за счет стандартных размеров и форм.

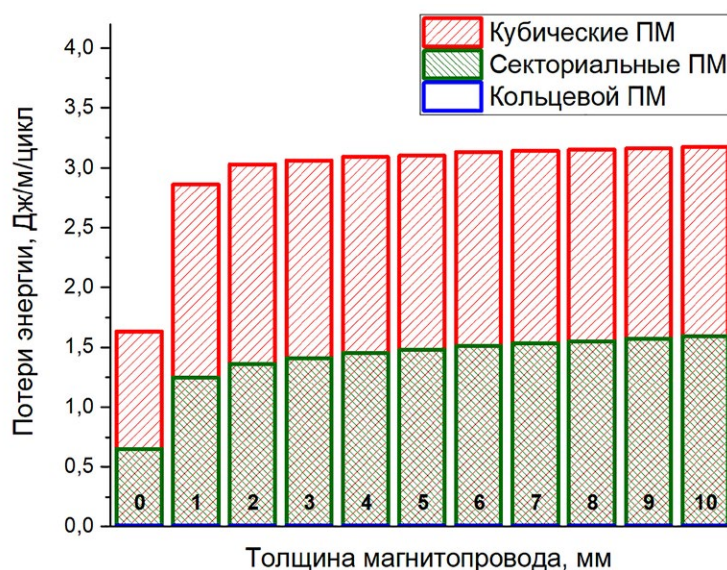


Рис. 4. Гистограмма энергетических потерь в ВТСП элементе подшипника для различных конфигураций блока магнитного основания

Fig. 4. Histogram of energy losses in the HTSC bearing element for different configurations of the magnetic base block

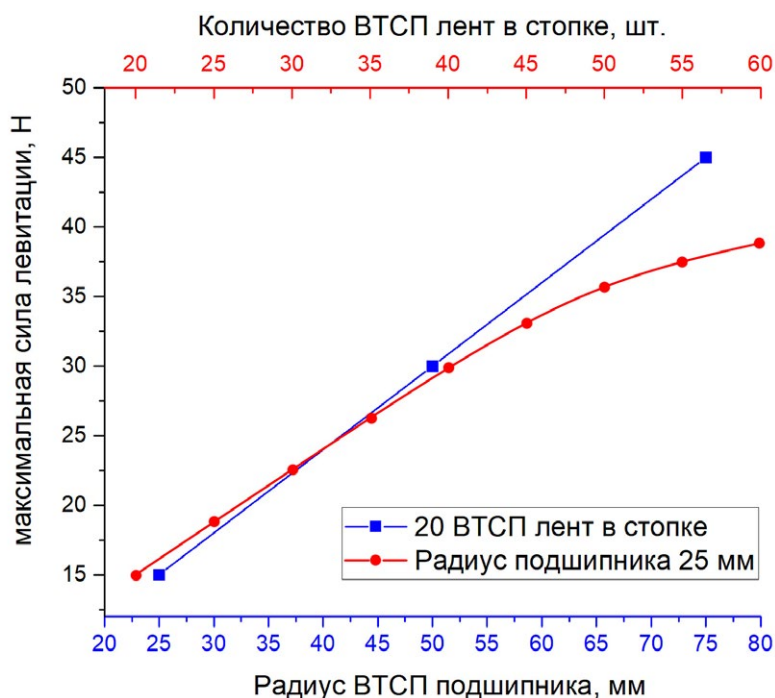


Рис. 5. Зависимости силы левитации от радиуса СМП при постоянном количестве ВТСП лент в стопке (20 ВТСП лент) и зависимости силы левитации от числа ВТСП лент в стопке при постоянном радиусе СМП (радиус 25 мм)

Fig. 5. Dependences of the levitation force on the radius of the SMP at a constant number of HTSC tapes in a stack (20 HTSC tapes) and dependences of the levitation force on the number of HTSC tapes in a stack at a constant radius of the SMP (radius 25 mm)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты численного анализа магнито-силовых и левитационных характеристик магнитных подшипников с использованием 2G ВТСП лент и различных конфигураций постоянных магнитов (кольцевые, кубические, секториальные, а также конфигурации с магнитопроводом). Особый акцент делается на масштабируемость систем и компенсацию недостатков магнитного поля отдельных конфигураций.

Установлено, что при масштабировании ВТСП подшипников кольцевые ПМ в магнитном основании могут быть заменены на секториальные с большей эффективностью в сравнении с использованием конфигурации из кубических постоянных магнитов. Секториальная конфигурация магнитного основания СМП позволяет частично сохранить преимущества кольцевого основания, обеспечивая более сильное и однородное магнитное поле. Сравнительно высокая однородность магнитного поля обеспечивает меньшие изменения магнитного взаимодействия между ВТСП элементами и постоянными магнитами при вращении, что, в свою очередь, способствует более плавному скольжению подшипника. Это не только улучшает его опорные функции, но и снижает потери энергии на перемагничивание. Это подтверждается результатами моделирования нагрузочных характеристик подшипника и расчетом энергетических потерь в подшипнике. Тем не менее подход использования секториальных ПМ при масштабировании является более сложным, поскольку требует изготовления магнитных секторов по индивидуальной схеме и с высокой точностью. Это приводит к увеличению стоимости и сложности производства, но может быть оправдано в случаях, когда требуется точная настройка магнитных характеристик. В то же время для более простых магнитных систем применение конфигурации кубических ПМ позволяет значительно снизить затраты на изготовление магнитного основания и повысить адаптируемость системы для различных приложений.

При дополнении магнитной системы магнитопроводом для улучшения концентрации и однородности магнитного поля может быть добавлен слой магнитомягкого железа. Установлено, что оптимальная высота магнитопровода для достижения наибольших левитационных сил составляет 10 мм, что равняется высоте одного постоянного магнита. Применение магнитопровода приводит к приросту максимальной силы левитации на 7% и 14% для кубической и секториальной конфигураций соответственно в сравнении с аналогичными геометриями СМП

без магнитопровода. Применение магнитопровода позволяет эффективно перенаправлять магнитные потоки, улучшая силовые характеристики подшипника. Однако релевантность масштабирования ВТСП систем в этом случае должна выполняться с учетом возрастающих потерь на перемагничивание при вращении ВТСП элементов.

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. Mukoyama S., Nakao K., Sakamoto H., et al. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Vol. 27, N. 4. P. 1-4. doi: 10.1109/TASC.2017.2652327
2. Miyazaki Y., Mizuno K., Yamashita T., et al. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system // Cryogenics. 2016. Vol. 80. P. 234-237. doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.05.011
3. Oliveira R., Zeng X., Pei X., Burke R. HTS-tape magnetic bearing for ultra high-speed turbo motor // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2023. Vol. 33, N. 5. P. 1-5. doi: 10.1109/TASC.2023.3253064
4. Kummeth P., Ries G., Nick W., Neumüller H.W. Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronous HTS motor // Superconductor Science and Technology. 2004. Vol. 17, N 5. P. S259. doi: 10.1088/0953-2048/17/5/032
5. Yang W., Ji Y., Yu L., et al. Low frequency rotational loss in a high-temperature superconducting bearing and its application in micro-thrust measurement for space propulsion // Superconductor Science and Technology. 2019. Vol. 33, N. 1. doi: 10.1088/1361-6668/ab58b9
6. Sakurai Y., Ashton P., Kusaka A., et al. Half-meter scale superconducting magnetic bearing for cosmic microwave background polarization experiments // J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1590. N. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012060

7. Ye M., Yang W., Wang Y., et al. Effect of temperature on rotation loss in a superconducting device for microthrust measurement of electric propulsion system // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015. Vol. 25, N 3. P. 1-4. doi: 10.1109/TASC.2015.2393555
8. Ruiz-Ponce G., Arjona M.A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission // *Energies*. 2023. Vol. 16, N. 4. P. 1721. doi: 10.3390/en16041721
9. Strasik M., Hull J.R., Mittleider J.A., et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperaturesuperconducting bearings // *Superconductor science and technology*. 2010. Vol. 23, N 3. P. 034021. doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034021
10. Hull J.R. Superconducting bearings // *Superconductor Science and Technology*. 2000. Vol. 13, N. 2. P. R1. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
11. Namburi D.K., Shi Y., Cardwell D.A. The processing and properties of bulk (RE) BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives // *Superconductor Science and Technology*. 2021. Vol. 34, N. 5. P. 053002. doi: 10.1088/1361-6668/abde88
12. Hussein A.A.A., Hussein A.M.A., Hasan N.A. Study of the properties of YBCO superconductor compound in various preparation methods: a short review // *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*. 2023. Vol. 3, N. 1. P. 65-79. doi: 10.53293/jasn.2022.4867.1156
13. Ogawa N., Hirabayashi I., Tanaka S. Preparation of a high-Jc YBCO bulk superconductor by the platinum doped melt growth method // *Physica C: Superconductivity*. 1991. Vol. 177, N. 1. P. 101-5. doi: [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(91\)90304-H](https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90304-H)
14. Sass F., Dias D.H.N., Sotelo G.G., de Andrade Junior R. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements // *Superconductor Science and Technology*. 2018. Vol. 31, N. 2. P. 025006. doi: 10.1088/1361-6668/aa9dc1
15. Osipov M., Anishenko I., Starikovskii A., et al. Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings // *Superconductor Science and Technology*. 2021. Vol. 34, N. 3. P. 035033. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
16. Coombs T.A., Wang Q., Shah A., et al. High-temperature superconductors and their large-scale applications // *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024. Vol. 1, N. 2. P. 788-801. doi: 10.1038/s44287-024-00112-y
17. Kurbatova E., Kurbatov P., Kuschenko E., et al. Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1559, N. 1. P. 012049. doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012049
18. Molodyk A., Samoilnikov S., Markelov A., et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, N. 1. P. 2084. doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
19. Martirosian I.V. Osipov .M.A., Starikovskii A.S., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving

- maglev system // *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022. Vol. 8, N. 4. P. 46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57
20. Shen B., Grilli F., Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications // *IEEE access*. 2020. Vol. 8. P. 100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177

REFERENCES

1. Mukoyama S, Nakao K, Sakamoto H, et al. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017;27(4):1-4. doi: 10.1109/TASC.2017.2652327
2. Miyazaki Y, Mizuno K, Yamashita T, et al. Development of superconducting magnetic bearing for flywheel energy storage system. *Cryogenics*. 2016;80:234-237. doi: 10.1016/j.cryogenics.2016.05.011
3. Oliveira R, Zeng X, Pei X, Burke R. HTS-tape magnetic bearing for ultra high-speed turbo motor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2023;33(5):1-5. doi: 10.1109/TASC.2023.3253064
4. Kummeth P, Ries G, Nick W, Neumüller HW. Development and characterization of magnetic HTS bearings for a 400 kW synchronous HTS motor. *Superconductor Science and Technology*. 2004;17(5):S259. doi: 10.1088/0953-2048/17/5/032
5. Yang W, Ji Y, Yu L, et al. Low frequency rotational loss in a high-temperature superconducting bearing and its application in micro-thrust measurement for space propulsion. *Superconductor Science and Technology*. 2019;33(1). doi: 10.1088/1361-6668/ab58b9
6. Sakurai Y, Ashton P, Kusaka A, et al. Half-meter scale superconducting magnetic bearing for cosmic microwave background polarization experiments. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1590. doi: 10.1088/1742-6596/1590/1/012060
7. Ye M, Yang W, Wang Y, et al. Effect of temperature on rotation loss in a superconducting device for microthrust measurement of electric propulsion system. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2015;25(3):1-4. doi: 10.1109/TASC.2015.2393555
8. Ruiz-Ponce G, Arjona MA, Hernandez C, Escarela-Perez R. A review of magnetic gear technologies used in mechanical power transmission. *Energies*. 2023;16(4):1721. doi: 10.3390/en16041721
9. Strasik M, Hull JR, Mittleider JA, et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings. *Superconductor science and technology*. 2010;23(3). doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034021
10. Hull JR. Superconducting bearings. *Superconductor Science and Technology*. 2000;13(2):R1. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
11. Namburi DK, Shi Y, Cardwell DA. The processing and properties of bulk (RE) BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives. *Superconductor Science and Technology*. 2021;34(5). doi: 10.1088/1361-6668/abde88
12. Hussein AAA, Hussein AMA, Hasan NA. Study of the properties of YBCO superconductor compound in various preparation methods: a short review.

- Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*. 2023;3(1):65-79. doi: 10.53293/jasn.2022.4867.1156
13. Ogawa N, Hirabayashi I, Tanaka S. Preparation of a high-Jc YBCO bulk superconductor by the platinum doped melt growth method. *Physica C: Superconductivity*. 1991;177(1):101-5. doi: [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(91\)90304-H](https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90304-H)
 14. Sass F, Dias DHN, Sotelo GG, de Andrade Junior R. Superconducting magnetic bearings with bulks and 2G HTS stacks: comparison between simulations using H and A-V formulations with measurements. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(2):025006. doi: 10.1088/1361-6668/aa9dc1
 15. Osipov M, Anishenko I, Starikovskii A, et al. Scalable superconductive magnetic bearing based on non-closed CC tapes windings. *Superconductor Science and Technology*. 2021;34(3):035033. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
 16. Coombs TA, Wang Q, Shah A, et al. High-temperature superconductors and their large-scale applications. *Nature Reviews Electrical Engineering*. 2024;1(12):788-801. doi: 10.1038/s44287-024-00112-y
 17. Kurbatova E, Kurbatov P, Kuschenko E, et al. Comparison of properties of a bulk HTS and a stack of HTS tapes after FC and ZFC. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1559(1). doi: 10.1088/1742-6596/1559/1/012049
 18. Molodyk A, Samoilenkov S, Markelov A, et al. Development and large volume production of extremely high current density YBa₂Cu₃O₇ superconducting wires for fusion. *Scientific Reports*. 2021;11(1). doi: 10.1038/s41598-021-81559-z
 19. Martirosian IV, Osipov MA, Starikovskii AS, Pokrovskii SV, Rudnev IA. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving maglev system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57
 20. Shen B, Grilli F, Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications. *IEEE access*. 2020;8:100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Стариковский Александр Сергеевич, инженер-исследователь;

eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID: 0000-0002-7605-7578;

E-mail: sanniyok1995@gmail.com

Балакина Мария Вадимовна, студент;

ORCID: 0009-0006-3831-8171;

E-mail: masha.ball.8530@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Cand. Sci. (Phys.-Math.), research engineer;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Aleksandr S. Starikovskii, research engineer;

eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID: 0000-0002-7605-7578;

E-mail: sannyyok1995@gmail.com

Maria V. Balakina, student;

ORCID: 0009-0006-3831-8171;

E-mail: masha.ball.8530@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com