

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN
TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES
peer-review journal

transsyst.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

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

ИНДЕКСАЦИЯ

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

КОНТАКТЫ

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

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

СВИДЕТЕЛЬСТВО о регистрации средства массовой информации

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

ОПИСАНИЕ ЖУРНАЛА

Сетевой электронный журнал «Инновационные транспортные системы и технологии» публикует статьи фундаментального характера и прикладного направления, а также обзорные статьи, относящиеся ко всем видам транспортной технологии

ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ

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

ISSN 2782-3733 (Online)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 10 | № 1 | 2024

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Титова Тамила Семёновна

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Смирнов Сергей Александрович

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

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Никитин Виктор Валерьевич

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

**"MODERN TRANSPORTATION
SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"**

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

INDEXING

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

CONTACTS

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

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

AIMS & SCOPE

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

JOURNAL CONTENT SELECTION

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

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Vol. 10 | Issue 1 | 2024

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL

EDITOR-IN-CHIEF

Tamila S. Titova

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

Deputy EDITOR-IN-CHIEF

Sergey A. Smirnov

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

THE SCIENTIFIC EDITOR

Viktor V. Nikitin

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Viktor A. Podsorin, Doctor of Economics Science, Professor Russian Transport University, Moscow, Russia;
Sirirangsi Poovadol, Dr.Sc., MBA, Deputy Dean Faculty of Logistics and Transportation Management
Panyapiwat Institute of Management, Pakkred, Thailand;

Vladimir N. Smirnov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Bridges PGUPS,
St. Petersburg, Russia;

Vladimir A. Solomin, Dr. Sc., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia;

Richard M. Stephan, Dr.Sc., Full Professor, Department of Electrical Engineering, Head of Electric Machines
Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil;

Klara V. Talantova, Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures
Natalya Tereshina, Dr. Economics, Professor, Head of the Department of Economics and Transport
Management Russian University of Transport, Moscow, Russia;

Han Hyung-Suk, PhD, Head of the Department of Maglev and Linear Drives, Principle Researcher,
Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), Daejeon, the Republic of Korea.

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Ахтямов Р.Г.

Пути трансформации транспортного профессионального образования
в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики5

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н.

Вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом,
совмещающим функции тяги и магнитного подвеса20

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Шевченко С.М., Алексеев С.В., Занин Д.И., Занина А.Д., Авечернко Г.А.

Технологические процессы обеспечения безопасности дорожного движения
на дорогах Санкт-Петербурга и Ленинградской области41

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

Карабаджак И.Д., Никитин В.В.

Варианты структуры автономной электроэнергетической системы
с батареей водородных топливных элементов59

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

Мартirosян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В., Руднев И.А.

Динамические характеристики магнитного подшипника на основе
высокотемпературных сверхпроводников при нарушении соосности ротора и статора76

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Дунаев М.Ю.

К вопросу регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента
линейного асинхронного двигателя93

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Филиппов Д.А., Ермошин Н.А.

Технологические решения по возведению дорожных конструкций из EPS-блоков110

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Быстров А.В., Давыдов А.В.

Процессный подход управления участковой системой ремонта железнодорожного пути125

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

Винникова К.О., Ефимова Е.Н., Шмелев А.В.

Определение себестоимости и тарификация контейнерных перевозок
на железнодорожном транспорте в современных условиях142

CONTENTS

ORIGINAL STUDIES

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Akhtyamov R.G.

Ways to transform transport vocational education in the context of training
for a low-carbon economy.....5

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Kireev A.V., Kozhemyaka N.M., Kononov G.N.

Issues of control of a linear switched reluctance electric drive, combining the functions
of electric traction and magnetic suspension.....20

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Shevchenko S.M., Alekseev S.V., Zanin D.I., Zanina A.D., Averchenko G.A.

Technological processes for ensuring road safety on the roads of St. Petersburg
and the Leningrad region.....41

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

Karabadzhack I.D., Nikitin V.V.

Options for the structure of an autonomous electric power system with a battery of hydrogen fuel cells59

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Martirosian I.V., Alexandrov D.A., Pokrovskii S.V., Rudnev A.I.

Dynamic characteristics of a magnetic bearing based on high temperature superconductors
in the event of rotor and stator misalignment.....76

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

Solomin V.A., Solomin A.V., Chekhova A.A., Dunaev M.Yu.

Issue of regulating the resistance of the short-circuited winding of the secondary element
of a linear induction motor93

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Filippov D.A., Yermoshin N.A.

Technological solutions for the construction of road structures from EPS blocks.....110

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Bystrov A.V., Davydov A.V.

Process approach to managing a local railway track repair system125

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

Vinnikova K.O., Efimova E.N., Shmelev A.V.

Determination of production cost and tariffication of contrailer transportation
on railway transport in modern conditions.....142

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

УДК 551.583.2

<https://doi.org/10.17816/transsyst595898>

© Р.Г. Ахтямов

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

ПУТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ

Цель. Разработка подходов к трансформации транспортного профессионального образования в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики.

Методы. Методом исследования является анализ существующих подходов к профессиональному образованию с учетом международного опыта, а также открытых источников информации различного характера.

Результаты. Предложены пути подготовки профильных специалистов, способных оценивать и управлять факторами климатического риска в рамках социально-экологических систем. В результате проведенного исследования предложены циклы обучения в зависимости от трансформационных изменений, которым способствует образование.

Заключение. Предложены образовательные модули, опирающиеся на межгосударственные и национальные стандарты, а также цели устойчивого развития и вопросы смягчения последствий изменения климата с учетом субъективных параметров, увеличивающих неопределенность при оценке климатических изменений.

Ключевые слова: изменение климата; устойчивое развитие; профессиональное образование; парниковые газы; обучение; адаптация; смягчение; адаптивное управление; неопределенность.

Как цитировать:

Ахтямов Р.Г. Пути трансформации транспортного профессионального образования в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 5–19.

<https://doi.org/10.17816/transsyst595898>

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

© **R.G. Akhtyamov**

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

WAYS TO TRANSFORM TRANSPORT VOCATIONAL EDUCATION IN THE CONTEXT OF TRAINING FOR A LOW-CARBON ECONOMY

Aim. This study aims to develop approaches to transforming transport vocational education in the context of training personnel for a low-carbon economy.

Methods. The research method was an analysis of existing approaches to vocational education considering international experience and open sources of information of various types.

Results. Ways to train specialized specialists who can assess and manage climate risk factors within socioecological systems are proposed. Because of this study, learning cycles were proposed depending on the transformational changes that education promotes.

Conclusion. Educational modules based on interstate and national standards and sustainable development goals and climate change mitigation issues considering subjective parameters that increase uncertainty in assessing climate change are proposed.

Keywords: climate change, sustainable development, vocational education, greenhouse gasses learning, adaptation, mitigation, adaptive management, uncertainty.

To cite this article:

Akhtyamov RG. Ways to transform transport vocational education in the context of training for a low-carbon economy. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):5–19. <https://doi.org/10.17816/transsyst595898>

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка кадров в высшей школе играет решающую роль в функционировании и развитии общества. Однако, выпускники высших учебных заведений, в первую очередь инженерных специальностей могут столкнуться с недостатком компетенций в области оценки последствий климатических изменений, а именно понимания его движущих сил и реагирования на реализацию факторов климатического риска [1–4].

В соответствии с [5] существуют два аспекта реагирования на изменения климата: смягчение последствий и адаптация к изменению климата. Смягчение последствий изменения климата определяется как вмешательство человека с целью сокращения источников выбросов парниковых газов или увеличения поглотителей парниковых газов. Адаптация к изменению климата – это процесс приспособления к фактическому или ожидаемому климату и его последствиям с целью смягчения вреда или использования возникающих при этом выгодных возможностей.

Существует несоответствие между тенденциями в области изменения климата и имеющимся уровнем кадровой подготовки в сфере экологии. Экологическое образование традиционно не учитывало влияние деятельности человека на окружающую среду, поскольку оно было сосредоточено на усилиях по сохранению окружающей среды. В настоящее время от профессионального образования в области окружающей среды требуется переход к образованию в области устойчивого развития и образованию по вопросам изменения климата. Указанные области являются сложными, поскольку они подразумевают взаимосвязь человеческой деятельности, экономического роста, состояния окружающей среды и социальных последствий.

Реализация образовательной политики высшей школы и подготовка, в том числе инженерных кадров, исторически основывалось на предпосылке, что климат будущего будет напоминать климат прошлого. Существующее изменение климата добавляет большую неопределенность к оценке опасностей и уязвимостей, с которыми столкнется выпускник вуза в своей профессиональной деятельности.

Так как изменение климата происходит в течение длительного времени, то существуют данные, как об используемых ранее, так и о современных подходах к адаптации по отношению к факторам климатического риска. Эти знания могут являться основой для обучения, в том числе, путем оценки мер по адаптации, смягчению и восстановлению после предыдущих воздействий факторов климатического риска.

Одной из задач такого обучения может являться оценка стратегий управления климатическими рисками, в том числе по отношению к распределению ресурсов и реализации мер, направленных на снижение риска, распределение риска, реагирование на природные стихийные явления и практику участия широкого круга заинтересованных сторон в выработке данных мер.

Целью настоящей работы является формирование подходов к трансформации транспортного профессионального образования в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики.

ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАНА АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА

Климатические изменения формируют перед обществом вызовы, ответы на которые требуют комплексной оценки, и включают не только организационные и технические задачи, но и изменения в подходах к профессиональному образованию.

В п. 16 Национального плана первого этапа адаптации к изменению климата [6] отмечена необходимость включения знаний об изменении климата и адаптации человека и экономики в федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) общего и среднего профессионального образования для просвещения детей и молодежи по вопросам адаптации к изменениям климата.

В настоящее время «применение географических знаний для самостоятельного оценивания уровня безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий: оценивать уровень безопасности окружающей среды, адаптации к изменению ее условий, в том числе на территории России; оценивать влияние последствий изменений в окружающей среде на различные сферы человеческой деятельности на региональном уровне; сопоставлять, оценивать и аргументировать различные точки зрения по актуальным экологическим и социально-экономическим проблемам мира и России» приведено только во ФГОС среднего общего образования (10–11 класс общеобразовательных учреждений) [7]. При этом вопросы профессионального обучения, разработки инженерных решений и научное обоснование подходов к адаптации не фигурируют в ФГОС среднего профессионального образования; высшего образования по направлениям подготовки бакалавриата, специалитета, магистров;

высшего образования по направлениям подготовки кадров высшей квалификации.

К профессиональному образованию в области изменения климата следует подходить на институциональном уровне, то есть к коллективному переключению внимания на текущую и прогнозируемую климатическую обстановку, с принятием коллективных действий [8]. Необходимо принять меры для подготовки выпускников высшего образования по профессиям, актуализированным в соответствии с условиями изменяющегося климата (например, образовательные программы: 08.03.01 – Строительство; 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника; 20.03.01 – Техносферная безопасность; 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 08.05.01 – Строительство уникальных зданий сооружений; 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства; 23.05.03 – Подвижной состав железных дорог; 23.05.04 – Эксплуатация железных дорог; 23.05.05 – Системы обеспечения движения поездов; 23.05.06 – Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей). Высшее образование является первой ступенью в профессиональном развитии инженера и формирует навыки, которые должны развиваться на протяжении всей профессиональной деятельности, с учетом вызовов современного мира.

При подготовке кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта необходимо учитывать, что в ряде случаев негативным фактором влияния при оценке климатического риска может служить не само опасное природное явление, а инициируемое им природное или техногенное событие, которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной объект транспортной инфраструктуры. Анализируя факторы климатического риска, необходимо определить все возможные объекты воздействия риска (объекты, находящиеся под воздействием опасных явлений; неблагоприятные условия погоды; аномальные климатические условия). Вместе с тем увеличение социально-экономического ущерба определяется не только факторами климатического риска, но и уязвимостью объектов транспортной инфраструктуры. Уязвимость определяется как значительной степенью износа объектов, так и имеющимися отклонениями от строительных норм и правил. Кроме того, уязвимость особенно ярко проявляется у объектов, расположенных на территориях, находящихся в зоне повышенного климатического риска.

Обеспечение необходимого уровня профессиональной подготовки кадров для реализации плана адаптации также должно включать

ознакомление с технологиями поглощения парниковых газов и способами их включения в деятельность отрасли [9].

ПУТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ ТРАНСПОРТНЫХ ВУЗОВ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Целью преобразований в образовательной политике транспортных вузов в условиях изменяющегося климата должна стать подготовка кадров, способных оценивать и управлять факторами климатического риска в рамках социально-экологических систем. Залогом устойчивости социально-экологических систем является их адаптивность и способность реорганизовываться после реализации факторов климатического риска при одновременном сохранении фундаментальной структуры и функционала в условиях меняющегося климата. Таким образом, возобновление нормальной работы является важным компонентом устойчивости.

Изучение социально-экологических систем должно основываться на понимании их сложной динамики, включая задержку в принятии решений, динамику запасов и потоков ресурсов, и петли обратной связи в условиях изменяющегося климата. Эвристика доступности и существующие ментальные модели иногда могут препятствовать обучению путем сокрытия всей сложности проблемы и усложнению подходов к реагированию [10].

Учитывая сложную динамику социально-экологических систем и их взаимодействие с изменяющимся климатом, целесообразно итеративное обучение, которое предполагает изменения по мере поступления новой информации о состоянии климатической системы.

Предлагаемая автором структура разделяет процессы обучения на три различных цикла в зависимости от трансформационных изменений, которым способствует образование. На рис. показаны циклы обучения и их применение на примере управления рисками наводнений.

В одноконтурных процессах обучения изменения вносятся на основе разницы между ожидаемыми и наблюдаемыми процессами. Одноконтурное обучение направлено на повышение эффективности реализуемых практических мероприятий.

В управление наводнениями, например, когда паводковые воды угрожают разрушить существующие средства защиты от наводнений, необходима установка или корректировка высоты защитной дамбы. На рис.

показано, что одноконтурное обучение фокусируется в первую очередь на действиях. Данные обобщаются, анализируются и используются, но используемые подходы к решению задачи не изменяются.

В двухконтурном процессе обучение расширяется до определения адекватности подходов к решению имеющихся задач, предлагаемых мер или стратегии управления. Корректирующие действия предпринимаются после того, как проблема переосмыслена и изменены подходы к управлению.

Например, анализируются цели текущего управления рисками наводнений для определения, являются ли они адекватными ожидаемым изменениям гидрологических экстремальных явлений в течение конкретного периода времени.



Рис. Циклы итеративного обучения на примере управления рисками наводнений

Fig. Iterative learning cycles using the example of flood risk management

Трехконтурное обучение затрагивает основополагающие принципы отталкиваясь от существующего контекста, при этом формулируются следующие вопросы: какие меры по смягчению и адаптации к изменению климата рассматриваются органами управления; каковы затраты на них и соответствующие стратегии; как социальные структуры, культурные нормы, господствующие ценностные структуры могут быть изменены для соответствия существующему контексту и т.д.

Например, тройная петля обучения может привести к формированию новых подходов к управлению рисками наводнений и совместному управлению рисками с привлечением дополнительных участников принятия решений для преодоления культурных, институциональных, национальных и других границ для существенного снижения риска наводнений.

Использование только одноконтурного обучения может привести к дезадаптации в быстро меняющихся климатических условиях. Одноконтурное обучение опирается на перечень существующих навыков характерных для существующей обстановки. Как следствие, возникновение быстрых или неожиданных изменений может не найти мер реагирования в одноконтурном обучении.

Двухконтурное и трехконтурное обучение лучше подходит для сопоставления диапазонов смягчения и адаптации к изменениям климата. Интеграция данных видов обучения в разработку мер по адаптации к изменениям климата будет более эффективно в условиях неопределённости.

Одним из путей трансформации образовательной политики высшей школы в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики в условиях изменения климата может быть введение следующих модулей, опирающихся на межгосударственные и национальные стандарты, на цели устойчивого развития и вопросы смягчения последствий изменения климата:

- изучение терминологии и современного состояния проблемы оценки климатических изменений в мире, с учетом специфики данных изменений в России;
- изучение видов геотекстиля, его структуры и способов применения. Особенности фильтрации и дренажа, а также укрепления грунта для повышения устойчивости земляного полотна с целью адаптации к изменению климата;

- изучение видов тяги с низким уровнем выбросов углерода, способствующих достижению нулевых выбросов в железнодорожной отрасли;
- изучение систем возобновляемой энергии и их роли в сокращении выбросов парниковых газов, а также достижении нулевых выбросов;
- изучение способов и технологий поглощения парниковых газов, которые могут быть использованы в транспортной отрасли и внести вклад в достижение нулевых выбросов.

Кроме традиционных способов преподавания содержание данных модулей может быть раскрыто путем проведения тематических исследований для иллюстрации развития инженерных наук и их практического применения для решения текущих задач в условиях изменения климата.

В результате освоения данных модулей студенты должны приобретать компетенции в следующих областях:

- оценка материалов с точки зрения экономической эффективности, воздействия на окружающую среду (например, углеродный след) и долгосрочной устойчивости, на основе использования оценки жизненного цикла материала;
- оценка характеристик склонов при различных количествах осадков и проведение оценки климатических рисков;
- демонстрация знаний о влиянии тяговых приводов на потребление энергии и о том, как различные варианты тяги могут способствовать смягчению последствий изменения климата и нулевым выбросам;
- понимание требований к инженерной деятельности для содействия устойчивому развитию и способность применять количественные методы для оценки затрат и выгод, связанных со смягчением последствий изменения климата и устойчивостью систем возобновляемой энергии;
- демонстрация понимания таких концепций, как смягчение последствий изменения климата, адаптация к изменениям климата и способность эффективно применять их в инженерных проектах;
- демонстрация понимания существующей практики и её ограничений, особенно в отношении смягчения последствий изменения климата и адаптации.

Тематические исследования, включенные в изучение представленных модулей, должны основываться на четком видении системных изменений, а также акцентировать внимание инженерного образования на смягчение

и адаптацию к изменению климата. Возможна реализация цели университета по развитию кампуса и обеспечению его устойчивости. По результатам оценки эффективности преподавания указанных модулей возможно включение ключевых понятий и подходов к смягчению и адаптации к изменениям климата в другие образовательные программы, модули и преподаваемые материалы.

СПОСОБЫ УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ПРОГНОЗЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Одним из основных субъективных параметров, увеличивающих неопределенность, является то обстоятельство, что отдельные лица и/или группы сосредоточены на краткосрочной перспективе разрабатываемой и реализуемой деятельности и ими могут игнорироваться маловероятные события с высоким уровнем ущерба. При этом выделены следующие факторы, влияющие на неопределенность:

- недооценка риска: при наличии информации о факторах риска, происходит недооценка вероятности события, этот фактор неопределенности может быть усилен естественной изменчивостью;
- при высоких первоначальных затратах, связанных с разработкой и реализацией мер по адаптации к изменениям климата, ресурсы направляются на краткосрочные цели, а не на получение потенциальных долгосрочных преимуществ в виде снижения рисков;
- трудности в поиске оптимального соотношения между затратами и получаемыми выгодами от проведения мероприятий по адаптации и смягчению последствий изменения климата, которые требуют сравнения величины затрат с ожидаемыми выгодами в виде снижения ущерба в будущем;
- откладывание принятия решения в случае неоднозначного выбора между альтернативами;
- временные интервалы между институциональными инвестициями в снижение факторов климатического риска и выгодами от данных инвестиций являются значительными, при этом возникает «невидимость» успешного снижения риска, которая может привести к откладыванию принятия решения и, как следствие к росту неопределенности.

Одним из путей сокращения неопределённости, основанной на субъективных параметрах, является внедрение адаптивного управления в сфере профессионального образования. В соответствии с [11, 12] под адаптивным управлением понимается процесс совершенствования практики управления с учетом результатов реализации стратегий, а также прогноза изменения внешних факторов. Принципы адаптивного управления могут внести свой вклад в процессно-ориентированный подход к управлению факторами климатического риска и уже используются в устойчивом управлении природными ресурсами в условиях неопределенности [13]. Целесообразность применения адаптивного управления в сфере профессионального образования связана с возможностями организаций избегать включенности в жесткие планы мероприятий и широком использовании новой информации, подходов и способов деятельности. Таким образом, ориентация на динамично меняющиеся экологические, экономические и социальные условия создает возможности для рассмотрения и внедрения инновационных методов управления климатическими рисками, в том числе с ориентацией на долгосрочные или относительно маловероятные события.

При запросе инвестиций организациям и структурами, использующими в своей деятельности адаптивное управление необходимо учитывать вероятность неполучения продукта или экономического эффекта в краткосрочной перспективе или в существующих условиях риска. Однако, получаемое разнообразие результатов позволяет повысить устойчивость функционирования и адаптивность инвестора при изменении факторов климатического риска, особенно при нелинейном направлении развития компонентов окружающей среды.

Развитие обучения, как итеративного процесса также является одним из способов сокращения неопределённости, основанной на субъективных параметрах. Динамическое понятие адаптации требует обучения как повторяющегося процесса для повышения устойчивости и способности к адаптации не только в отдаленном будущем, но и в краткосрочной перспективе. Это обусловлено тем, что для снижения негативного воздействия факторов климатического риска на объекты инфраструктуры необходимо производить их проектирование, и внедрять меры по адаптации на стадии строительства и эксплуатации, исходя из актуальных климатических изменений.

В этой связи целесообразно рассматривать обучение как постоянный и итеративный процесс, при котором участники понимают смысл

системных изменений, участвуют в реализации мер по адаптации к изменению климата и прогнозируют будущие изменения. Таким образом, профессиональное обучение становится ключевым компонентом деятельности в условиях меняющегося климата, что приобретает особую актуальность в условиях неопределенности. В качестве основы для данного типа трансформации профессионального образования может выступать создание такого типа социального и образовательного пространства для обучения и исследований, которое поощряет конкуренцию мнений и подходов к решению актуальных задач, создает систему знаний, построенную на разделяемых участниками образовательного процесса ценностях, а также способствует инновационному и творческому подходу в разработке мер адаптации к изменениям климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При подготовке кадров для реализации плана адаптации к изменениям климата в области транспорта необходимо учитывать, что в ряде случаев негативным фактором влияния при оценке климатического риска может служить не само опасное природное явление, а инициируемое им природное или техногенное событие, которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной объект транспортной инфраструктуры.

Целью трансформации образовательной политики транспортных вузов в условиях меняющегося климата должна стать подготовка кадров способных оценивать и управлять факторами климатического риска в рамках социально-экологических систем. Одним из путей трансформации образовательной политики высшей школы в контексте подготовки кадров для низкоуглеродной экономики в условиях изменения климата может быть введение ряда модулей, опирающихся на межгосударственные и национальные стандарты, цели устойчивого развития и вопросы смягчения последствий изменения климата.

Таким образом, профессиональное обучение становится ключевым компонентом деятельности в условиях меняющегося климата, что приобретает особую актуальность в условиях неопределенности. В качестве основы для данного типа трансформации профессионального образования может выступать создание такого типа социального и образовательного пространства для обучения и исследований, которое поощряет конкуренцию мнений и подходов к решению актуальных задач, создает систему знаний, построенную на разделяемых

участниками образовательного процесса ценностях, а также способствует инновационному и творческому подходу в разработке мер адаптации к изменениям климата.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jorgenson S.N., Stephens J.C., White B. Environmental Education in Transition: A Critical Review of Recent Research on Climate Change and Energy Education // J. Environ. Educ. 2019. Vol. 50. P. 160–171. doi:10.1080/00958964.2019.1604478
2. Rudd J.A. From Climate Change Ignorant to Climate Change Educator // Chem. Eur. J. 2021. Vol. 27. P. 6107–6111. doi: 10.1002/chem.202004414
3. Shealy T., Katz A., Godwin A., et al. Civil Engineering Students' Beliefs about Global Warming and Misconceptions about Climate Science // J. Civ. Eng. Educ. 2021. Vol. 147. P. 04021011. doi:10.1061/(asce)ei.2643-9115.0000050
4. Milovanovic J., Shealy T., Godwin A. Senior Engineering Students in the USA Carry Misconceptions about Climate Change: Implications for Engineering Education // J. Clean. Prod. 2022. Vol. 345. P. 131129. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131129
5. IPCC. AR6 WPII Annex II Glossary. Дата обращения: 23.08.2023. Режим доступа: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf
6. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года. Дата обращения: 23.08.2023. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf>
7. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования. Дата обращения: 23.08.2023. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70188902/8ef641d3b80ff01d34be16ce9bafc6e0/>
8. Axelithioti P, Fisher RS, Ferranti E, et al. What Are We Teaching Engineers about Climate Change? Presenting the MACC Evaluation of Climate Change Education // Educ. Sci. 2023. Vol. 13. P. 153. doi:10.3390/educsci13020153
9. Титова Т.С., Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Пути совершенствования плана адаптации к изменениям климата в области транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 5–18. EDN: FTBFCZ, doi: 10.17816/transsyst2023925-18
10. Lavell A, Oppenheimer M, Diop C, et al. Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. P. 25–64. doi:10.1017/cbo9781139177245.004

11. Pahl-Wostl C. A conceptual framework for analyzing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes // *Global Environmental Change*. 2009. Vol. 19, N. 3. P. 354–365. doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.06.001
12. Pahl-Wostl C., Craps M., Dewulf A., et al. Social learning and water resources management // *Ecology and Society*. 2007. Vol. 12, N. 2. P. 5. doi:10.5751/es-02037-120205
13. Medema W., McIntosh B.S., Jeffrey P.J. From premise to practice: a critical assessment of integrated water resources management and adaptive management approaches in the water sector // *Ecology and Society*. 2008. Vol. 13, N. 2. P. 29. doi:10.5751/es-02611-130229

REFERENCES

1. Jorgenson SN, Stephens JC, White B. Environmental Education in Transition: A Critical Review of Recent Research on Climate Change and Energy Education. *J. Environ. Educ.* 2019;50:160–171. doi:10.1080/00958964.2019.1604478
2. Rudd JA. From Climate Change Ignorant to Climate Change Educator. *Chem. Eur. J.* 2021;27:6107–6111. doi: 10.1002/chem.202004414
3. Shealy T, Katz A, Godwin A, et al. Civil Engineering Students' Beliefs about Global Warming and Misconceptions about Climate Science. *J. Civ. Eng. Educ.* 2021;147:04021011. doi:10.1061/(asce)ei.2643-9115.0000050
4. Milovanovic J, Shealy T, Godwin A. Senior Engineering Students in the USA Carry Misconceptions about Climate Change: Implications for Engineering Education. *J. Clean. Prod.* 2022;345:131129. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131129
5. IPCC. AR6 WPII Annex II Glossary. [cited 28 Aug 2023] Available from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf
6. Nacional'nyj plan meropriyatij pervogo etapa adaptacii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda [Internet] (In Russ.) [cited 28 Aug 2023] Available from: <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf>
7. Federal'nyj gosudarstvennyj obrazovatel'nyj standart srednego obshchego obrazovaniya [Internet] (In Russ.) [cited 28 Aug 2023] Available from: <https://base.garant.ru/70188902/8ef641d3b80ff01d34be16ce9bafc6e0/>
8. Axelithioti P, Fisher RS, Ferranti E, et al. What Are We Teaching Engineers about Climate Change? Presenting the MACC Evaluation of Climate Change Education. *Educ. Sci.* 2023;13:153. doi:10.3390/educsci13020153
9. Titova TS, Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):5–18. (Russ.) EDN: FTBFCZ, doi: 10.17816/transsyst2023925-18
10. Lavell A, Oppenheimer M, Diop C, et al. Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2012:25–64. doi:10.1017/cbo9781139177245.004
11. Pahl-Wostl C. A conceptual framework for analyzing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change*. 2009;19(3):354–365. doi:10.1016/j.gloenvcha.2009.06.001

12. Pahl-Wostl C, Craps M, Dewulf A, et al. Social learning and water resources management. *Ecology and Society*. 2007;12(2):5. doi:10.5751/es-02037-120205
13. Medema W, McIntosh BS, Jeffrey PJ. From premise to practice: a critical assessment of integrated water resources management and adaptive management approaches in the water sector. *Ecology and Society*. 2008;13(2):29. doi:10.5751/es-02611-130229

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

Rasul Akhtyamov, Candidate of Sciences in Engineering;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.331.5

<https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

© А.В. Киреев, Н.М. Кожемяка, Г.Н. Кононов

АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н»

(Новочеркасск, Россия)

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ, СОВМЕЩАЮЩИМ ФУНКЦИИ ТЯГИ И МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Обоснование. В настоящей статье рассматриваются вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса. При введении в систему привода дополнительной координаты управления с помощью магнитного подвеса возникает задача о видоизменении алгоритмов управления и исследовании на их основе тяговых свойств электропривода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса.

Цель работы – исследование алгоритмов управления, обеспечивающих приоритет магнитного подвеса в задаче управления линейным электроприводом, совмещающим функции тяги и подвеса.

Материалы и методы. Основными методами исследования являются компьютерное моделирование, расчетные исследования, анализ результатов, полученных в ходе настоящих исследований.

Результаты. Предложен подход к выбору параметров управления, позволяющий минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса.

Закключение. Практическая значимость определяется возможностью использования предложенного подхода при проектировании системы управления как комбинированной системы тяги и подвеса грузовой транспортной платформы.

Ключевые слова: линейный вентильно-индукторный электропривод; электромагнитный подвес; алгоритм управления; линейный электропривод; комбинированная система тяги и магнитного подвеса.

Как цитировать:

Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 20–40. <https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.V. Kireev, N.M. Kozhemyaka, G.N. Kononov

JSC “Scientific and Technical Center” PRIVOD-N”

(Novocherkassk, Russia)

**ISSUES OF CONTROL OF A LINEAR SWITCHED RELUCTANCE
ELECTRIC DRIVE COMBINING THE FUNCTIONS OF
ELECTRIC TRACTION AND MAGNETIC SUSPENSION**

Background. This study discusses the issues of controlling a linear switched reluctance electric drive combining the functions of traction and magnetic suspension. When an additional magnetic suspension control coordinate is introduced into the drive system, the task of modifying the control algorithms and studying, based on this, the traction properties of the electric drive under the restrictions imposed by the magnetic suspension system arises.

Aim. This study aims to examine the control algorithms that ensure the priority of magnetic suspension in the problem of controlling a linear electric drive combining the functions of traction and suspension.

Materials and Methods. The main research methods used are computer modeling, computational studies, and analysis of research results.

Results. An approach to the selection of control parameters is proposed that allows minimizing the impact of the drive operating mode on the electromagnetic suspension system.

Conclusion. The practical significance of the proposed approach is that it can be used in the design of a control system for a combined traction system and suspension of a cargo transport platform.

Keywords: linear switched reluctance electric drive; electromagnetic suspension; control algorithm; linear electric drive; combined traction and magnetic suspension system.

To cite this article:

Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Issues of control of a linear switched reluctance electric drive, combining the functions of electric traction and magnetic suspension. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2024;10(1):20–40. <https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается интенсивное внедрение в России и за рубежом вентильно-индукторных реактивных электроприводов (ВИРЭП) средней и большой мощностей в различных технических системах [1–7]. Это связано с присущим реактивным индукторным двигателям (РИД) рядом преимуществ по сравнению с другими частотно управляемыми электрическими машинами переменного тока: конструктивно более просты; технологичны в изготовлении, обслуживании и ремонте; имеют меньшую себестоимость; обладают повышенной энергоэффективностью; более высокой перегрузочной способностью; отказоустойчивостью [8], что имеет решающее значение для ответственной техники.

По своей структуре ВИРЭП ничем не отличается от классической системы регулируемого электропривода [9]. Однако, в отличие от регулируемого электропривода, например, с асинхронным двигателем, реактивная индукторная машина, входящая в состав ВИРЭП, не является самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управления являются неотъемлемыми частями, необходимыми для осуществления электромеханического преобразования энергии. В классе приводов с вращающимися электрическими машинами управление ВИРЭП сводится к формированию однополярного импульса фазного тока заданной формы, синхронизированного с изменением взаимного положения зубцов статора и ротора реактивного индукторного двигателя [9, 10]. Формирование фазного тока заданной формы осуществляется путем коммутации силовых ключей преобразователя по алгоритму, формируемому системой управления. Алгоритм генерирует управляющие сигналы подключения (отключения) обмотки двигателя от источника питания.

Линейный вариант ВИРЭП рассматривается в проектах создания транспортных систем с магнитным подвесом [11–13]. Этот тип электрической машины позволяет создать комбинированную систему, совмещающую функции тяги и магнитного подвеса в одном объекте, а также создать пассивную дискретную путевую структуру со сниженной материалоемкостью. Управление, как тягой, так и подвесом должно осуществляться, с использованием всего одного канала управления токами в обмотках фаз двигателя. При расширении функций двигателя за счет введения дополнительной координаты управления магнитным подвесом возникает задача модификации существующих алгоритмов

управления, для обеспечения приоритета магнитного подвеса в задаче управления линейным двигателем, а также исследование тяговых свойств привода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса.

В настоящей работе дано описание модифицированного алгоритма управления линейным ВИРЭП, предложен подход к выбору параметров управления, обеспечивающих приоритет магнитного подвеса, приведены результаты исследований тяговых возможностей электропривода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса и изменении массы груза.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнены на Simulink-модели трехфазного тягово-левитационного модуля грузовой транспортной платформы [14]. На рис. 1 показана блок-схема Simulink-модели, включающая в свой состав подсистемы “Задание режима”, Фаза А”, “Фаза В”, “Фаза С”, блоки суммирования сигналов “Add”, “Add1”, подъемных сил F_z и сил тяги F_x , создаваемых фазами двигателя. Выходные сигналы модели объединяются в общую шину и подаются на вход блока “To File”, для записи в файл.

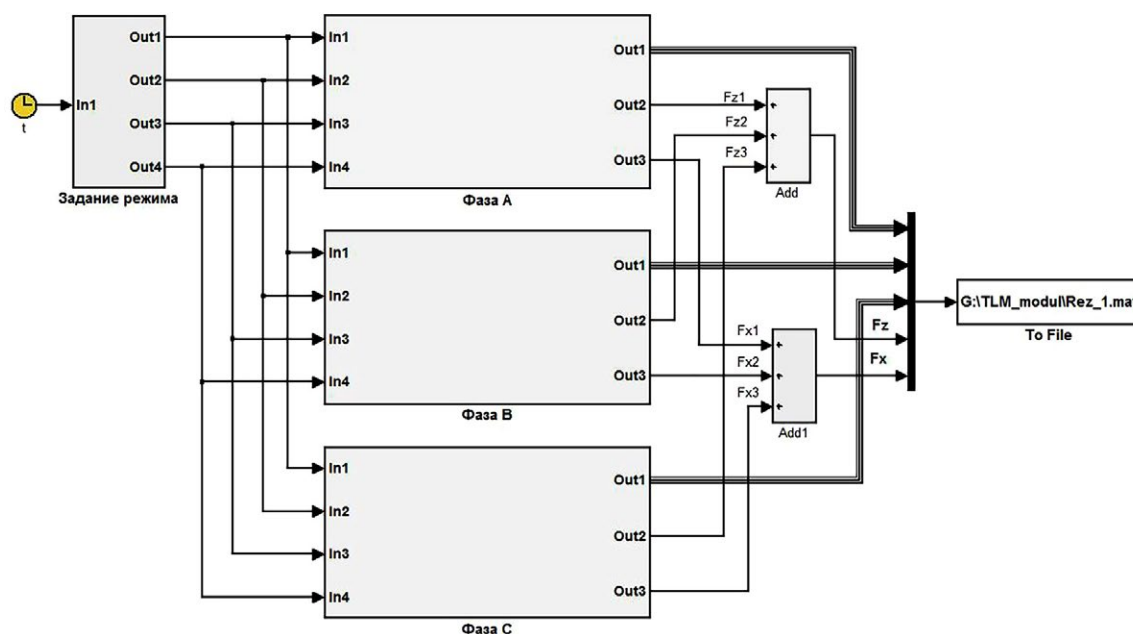


Рис. 1. Блок-схема Simulink-модели модуля

Fig. 1. Block diagram of the Simulink module model

Электромагнитные процессы в контурах фаз двигателя описываются уравнением:

$$u_k(t) = i_k(t) \cdot R_k + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z, t)}{\partial i_k} \cdot \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z, t)}{\partial x} \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \quad (1)$$

где u_k – напряжение, прикладываемое к обмотке статора; i_k – ток в обмотке статора; Ψ_k – потокосцепление электромагнитного контура; R_k – сопротивление обмотки статора активное; t – текущее значение времени; x – координата линейного перемещения; z – координата вертикального перемещения; k – номер электромагнитного контура.

Предполагается, что электромагнитные контуры статоров двигателя изолированы друг от друга в магнитном отношении, величина воздушного зазора между статором и ротором принимает постоянное значение.

Потокосцепления обмоток статора $\Psi_k(i, x, z)$, подъемная сила $F_z(i, x, z)$, силы тяги $F_x(i, x, z)$ рассчитываются предварительно на 3-D модели магнитной системы модуля (см. рис. 2) и вводятся в Simulink-модель в табличном виде.

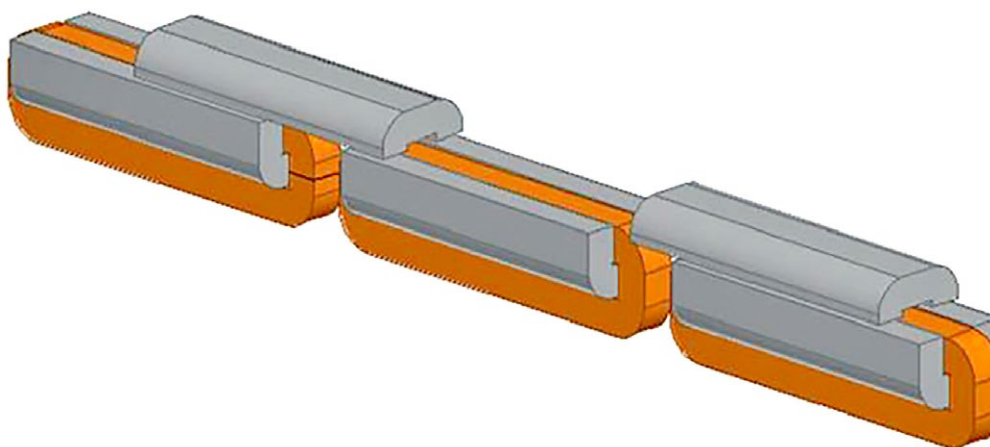


Рис. 2. 3-D модель магнитной системы модуля

Fig. 2. 3-D model of the module's magnetic system

Достоверность результатов моделирования определяется в основном точностью воспроизведения характеристик магнитной системы модуля при проведении полевых расчетов на 3D-модели.

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

В известных алгоритмах управления тягой вращающихся реактивных индукторных машин [14, 15] питание обмоток статора производится однополярными импульсами тока. Для этого из постоянного напряжения источника питания U_d формируются двухполярные импульсы напряжения, модулированные по частоте с регулируемой скважностью и фазой относительно взаимного положения зубцов статора и ротора. Сила тяги двигателя зависит как от значения фазного тока, так и от его конфигурации относительно взаимного пространственного положения зубцов статора и ротора.

На рис. 3 показаны типичные для вращающихся машин осциллограммы фазного тока $i(\theta)$ и напряжения $u(\theta)$. Для организации управления используется сигнал датчика положения ротора $U_{ДПР}$. Управляющими величинами в терминологии, предложенной в [5] являются: угол опережения включения α ; угол проводимости β ; порог ограничения амплитуды тока $I_{огр}$.

Нетрудно заметить, что управляющее воздействие (напряжения, прикладываемое к обмотке двигателя) является функцией своих компонент:

$$u = U_d \cdot f(\alpha, \beta, I_{огр}) \quad (2)$$

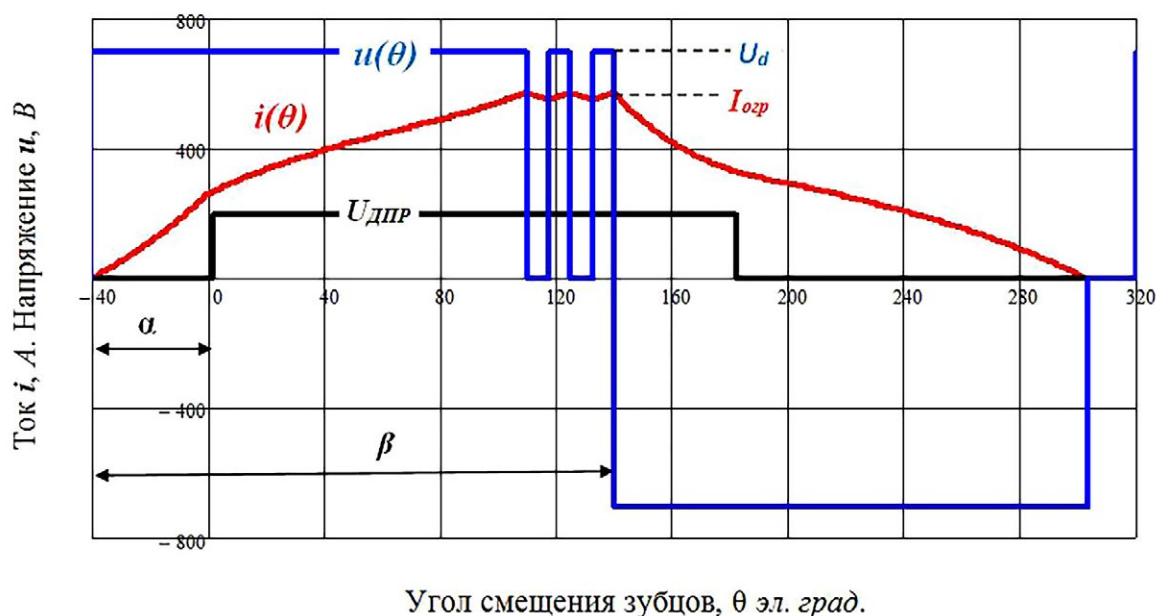


Рис. 3. Осциллограммы процессов в фазе двигателя

Fig. 3. Oscillograms of processes in the motor phase

При попытке адаптации данного алгоритма к управлению линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, выявлены две проблемы:

- проблема реализации заданной подъемной силы F_z ;
- проблема распределение управляющих величин по каналам управления тягой и подвесом.

Первая проблема связана с тем, что с увеличением скорости движения трапецеидальный импульс фазного тока вырождается в треугольный импульс с ограниченной вершиной. Это существенно снижает величину подъемной силы. Исследования показали, что снижение подъемной силы может быть компенсировано увеличением длительности импульса тока (за счет увеличения угла β). При определенном значении угла β импульсы тока “сливаются”, и форма фазного тока из импульсной превращается в пульсирующую с постоянной составляющей тока подмагничивания $I_{подм}$, как показано на рис. 4.

Режим работы двигателя с током подмагничивания не характерен для вращающихся машин данного класса, однако, его использование в двигателе совмещающим функции тяги и подвеса позволяет при высоких скоростях движения реализовать потенциал создания подъемной силы, заложенный при проектировании магнитной системы двигателя.

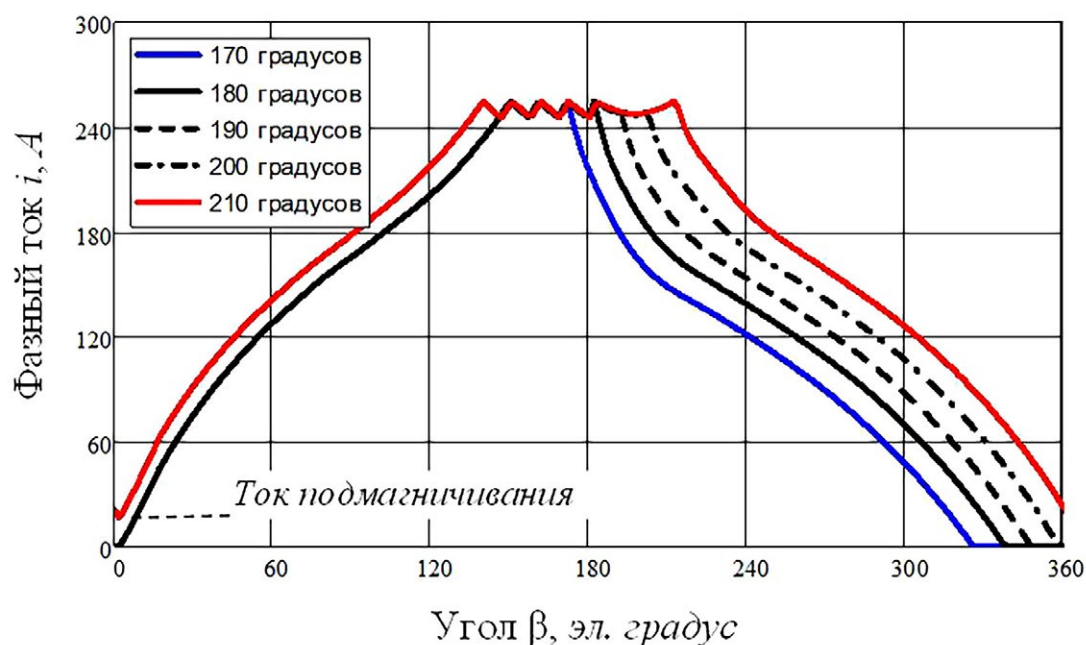


Рис. 4. Осциллограммы фазного тока при $\beta = var$

Fig. 4. Oscillograms of phase current at $\beta = var$

Переход из режима импульсного тока в режим пульсирующего тока качественно изменяет характеристики двигателя. Например, на рис. 5 приведены графики зависимостей подъемной силы $F_{IZ} = f(\beta)$ и силы тяги $F_{IX} = f(\beta)$ при $\alpha_1 = 15$ эл. град., $F_{2Z} = f(\beta)$ и $F_{2X} = f(\beta)$ при $\alpha_2 = 25$ эл. град., $I_{опр} = 250$ А. На рисунке обозначен интервал изменения угла β , соответствующий режиму пульсирующего тока (с током подмагничивания).

На графиках наблюдается линейный рост подъемной силы F_{IZ} во всем диапазоне изменения угла β и линейное снижение силы тяги F_{IX} в диапазоне импульсного тока. В диапазоне пульсирующего тока сила тяги F_{IX} остается практически постоянной. Увеличение угла α с 15 до 20 эл. град. приводит к росту силы тяги F_{2X} и незначительному уменьшению подъемной силы F_{2Z} во всем диапазоне изменения угла β . При этом характер изменения зависимостей $F_{2X} = f(\beta)$ и $F_{2Z} = f(\beta)$ остается прежним.

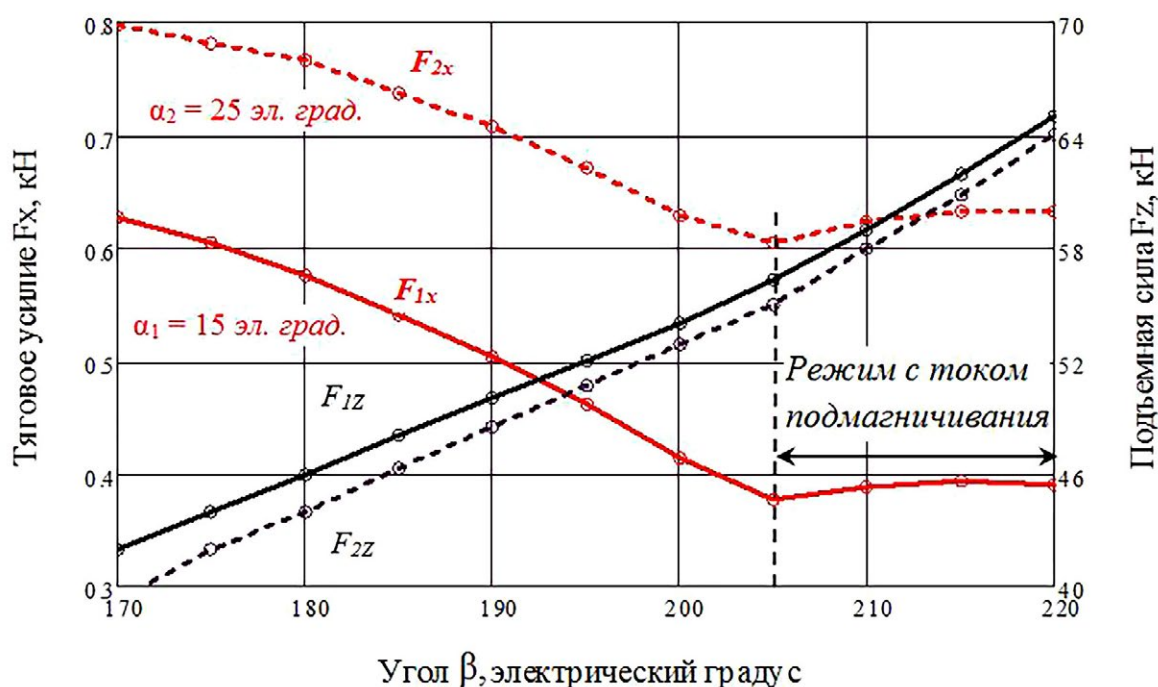


Рис. 5. Графики зависимостей $F_Z = f(\beta)$ и $F_X = f(\beta)$

Fig. 5. Dependency graphs $F_Z = f(\beta)$ и $F_X = f(\beta)$

Важно отметить, что в режиме с током подмагничивания наблюдается снижение взаимного влияния систем тяги и подвеса. Указанное обстоятельство может быть использовано для улучшения динамики системы магнитного подвеса.

Вторая проблема связана с тем, что каналы управления тягой и подвесом существенно различаются по динамическим свойствам. В системе присутствует инерционный канал управления тягой и высоко динамичный канал стабилизации неустойчивого равновесия подвеса.

Заметим, что в структуре управляющей величины (2) также присутствуют разно темповые компоненты. Управляющее воздействие, вызванное изменением $I_{огр}$ реализуются мгновенно. Управляющее воздействия, вызванные изменением углов α , β , реализуются с задержкой, равной периоду фазного напряжения. Очевидно, что быстродействующая управляющая компонента $I_{огр}$ должна быть включена в контур магнитного подвеса.

Кроме того, установлено, что:

- увеличение угла α сопровождается линейным ростом силы тяги F_X и снижением подъемного усилия F_Z ;
- увеличение угла β сопровождается ростом подъемной силы F_Z и снижением силы тяги F_X .

Очевидно, что эти два параметра управления оказывают «разнонаправленное» воздействие на характеристики объекта управления.

С учетом выявленного влияния, управляющие величины целесообразно распределить по каналам управления следующим образом:

- угол α – канал управления силой тяги;
- $I_{огр}$ и $\Delta\beta$ – канал управления магнитным подвесом.

При этом быстродействующая управляющая компонента $I_{огр}$ должна обеспечивать компенсацию текущих возмущений, а инерционная компонента $\Delta\beta$ – подстройку системы в соответствии с заданным критерием управления системой подвеса.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Приоритет магнитного подвеса в задаче управления линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, накладывает ограничение на систему тяги. Условием работоспособности магнитного подвеса является обеспечение заданного значения подъемной силы $F_z = const$ при постоянном значении напряжения источника питания U_d , массы M , и воздушного зазора δ . Очевидно, что последнее условие может быть выполнено при различных комбинациях значений параметров управления $I_{огр}$, α , β в рабочем диапазоне скоростей линейного перемещения.

При такой постановке задачи тяговая характеристика двигателя является функцией параметров управления, при постоянстве подъёмной силы:

$$F_x(V) = f(I_{opr}(V), \alpha(V), \beta(V)), \quad F_z(V) = const, \quad (3)$$

Рассмотрим вопрос определения параметров управления для заданного значения скорости. Введем в рассмотрение угол $\Delta\beta$, который связан с углом проводимости β следующим соотношением:

$$\Delta\beta = \beta - 180 \quad (4)$$

Тогда в новой системе отсчета α , $\Delta\beta$, I_{opr} фазный ток формируется следующим образом (см. рис. 6). Для организации управления используется опорный сигнал U_o . По переднему фронту опорного сигнала управления на фазную обмотку подается напряжение от источника питания U_d с углом опережения α . Фазный ток нарастает и ограничивается на уровне I_{opr} . От заднего фронта сигнала U_o отсчитывается угловой интервал $\Delta\beta$, по окончании которого напряжение источника питания отключается от обмотки и ток спадает до значения $I_{подм}$. С этого значения тока начинается очередной период формирования тока.

Предположим, что существует область управления, определяемая значениями параметров I_{opr} , α , $\Delta\beta$, в которой выполняется условие $F_z = const$.

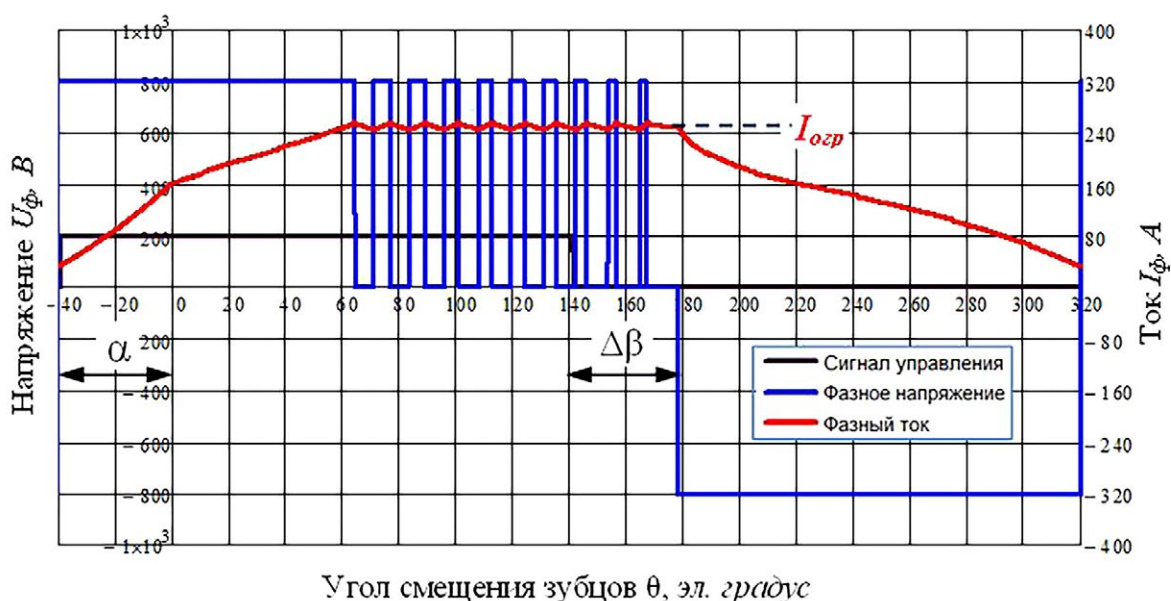


Рис. 6. Графики зависимостей $F_z = f(\beta)$ и $F_x = f(\beta)$

Fig. 6. Dependency graphs $FF_z = f(\beta)$ and $F_x = f(\beta)$

Введем в рассмотрение функцию:

$$I_{opr} = f(\alpha, \Delta\beta) \quad (5)$$

такую, что при любых значениях в области ее определения выполняется условие

$$F_z = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) = const \quad (6)$$

Тогда сила тяги и действующее значение фазного тока будут определяться следующими функциональными зависимостями:

$$F_x = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) \quad (7)$$

$$I_{\phi} = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) \quad (8)$$

На модели объекта выполнены расчёты функций (5, 7, 8) при выполнении условия (6). Приняты следующие исходные данные: $U_d = 800$ В, $V_x = 200$ км/ч, $F_z = 56$ кН, $\delta = 10$ мм в диапазоне изменения координат $\alpha = 15...60$ эл. град., $\Delta\beta = 25...45$ эл. град.

Рассмотрим графики линий равного уровня функций (5, 7, 8), совмещенные на координатной плоскости координат α , $\Delta\beta$ (см. рис. 7).

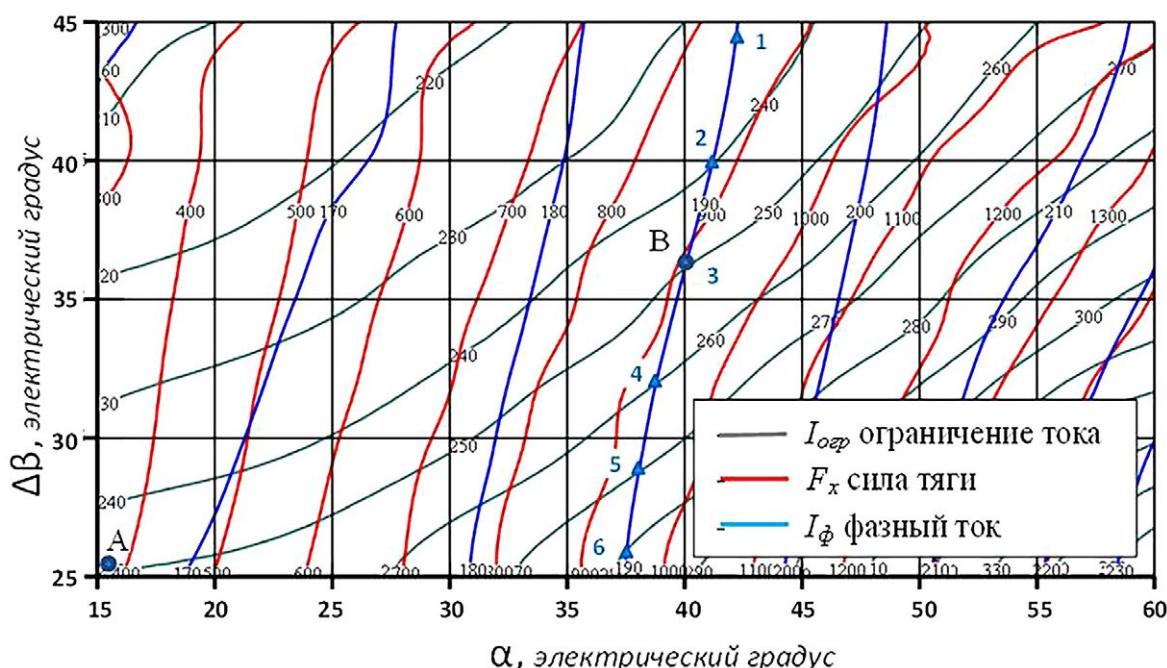


Рис. 7. Графики линий уровня функций

Fig. 7. Function level line graphs

Приведенные графики обладают важным свойством – любой точке, принадлежащей координатной плоскости, можно поставить в соответствие координаты управления двигателем $I_{огр}$, α , $\Delta\beta$, при которых выполняется условие $F_z = const$. Кроме того, этому условию каждой точке на координатной плоскости соответствуют значения силы тяги F_x , действующего значения фазного тока I_ϕ .

Например, в точке «В» с координатами управления $\alpha = 37$ электрических градусов, $\Delta\beta = 40$ электрических градусов, $I_{огр} = 250$ А, реализуется сила тяги $F_x = 900$ Н при фазном токе $I_\phi = 190$ А. Обратим внимание, что то же самое значение силы тяги может быть получено при других параметрах управления и фазном токе. Для устранения такой неоднозначности необходимо определить ограничения, накладываемые на параметры управления.

Последнее обстоятельство, прежде всего, является ограничением действующего значения фазного тока I_ϕ , определяющего тепловой режим двигателя. Как известно, в тяговом электроприводе нормируются параметры часового и продолжительного режимов работы двигателя [16]. В данном примере на рис. 7 нанесена точка «А», соответствующая продолжительному режиму работы двигателя при параметрах управления $\alpha = 15$ эл. град., $\Delta\beta = 25$ эл. град., $I_{огр} = 250$ А. В этом режиме реализуется сила тяги $F_x = 378$ Н при фазном токе $I_\phi = 168$ А. По аналогии с вращающимися машинами данного класса можно выбрать параметры часового режима. Например, ток часового режима тягового реактивного индукторного двигателя НТИ-350 электропоезда [5] примерно на 13% больше тока продолжительного режима работы. Используя аналогию, в данном примере фазный ток часового режима можно принять равным $I_\phi = 190$ А. На рис. 7 нанесена точка «В» часового режима при параметрах управления $\alpha = 40$ эл. град., $\Delta\beta = 37$ эл. град., $I_{огр} = 250$ А. В этом режиме реализуется сила тяги $F_x = 900$ Н при фазном токе $I_\phi = 190$ А.

Анализ расположения линий уровня на плоскости параметров α , $\Delta\beta$, показывает, что заданное значение фазного тока I_ϕ может быть реализовано при различных значениях $I_{огр}$. Например, на линии уровня $I_\phi = 190$ А нанесены точки 1 – 6 (в форме треугольника синего цвета), в точках пересечения с линиями уровня $I_{огр}$ (черного цвета). На рисунке 8 приведен график зависимости $F_x = f(I_{огр})$ при $I_\phi = 190$ А в диапазоне изменения параметров управления $37 \leq \alpha \leq 43$ эл. град., $26 \leq \Delta\beta \leq 44$ эл. град. (от точки 1 до точки 6), а также показаны осциллограммы фазного тока, соответствующие точкам 1 и 6.

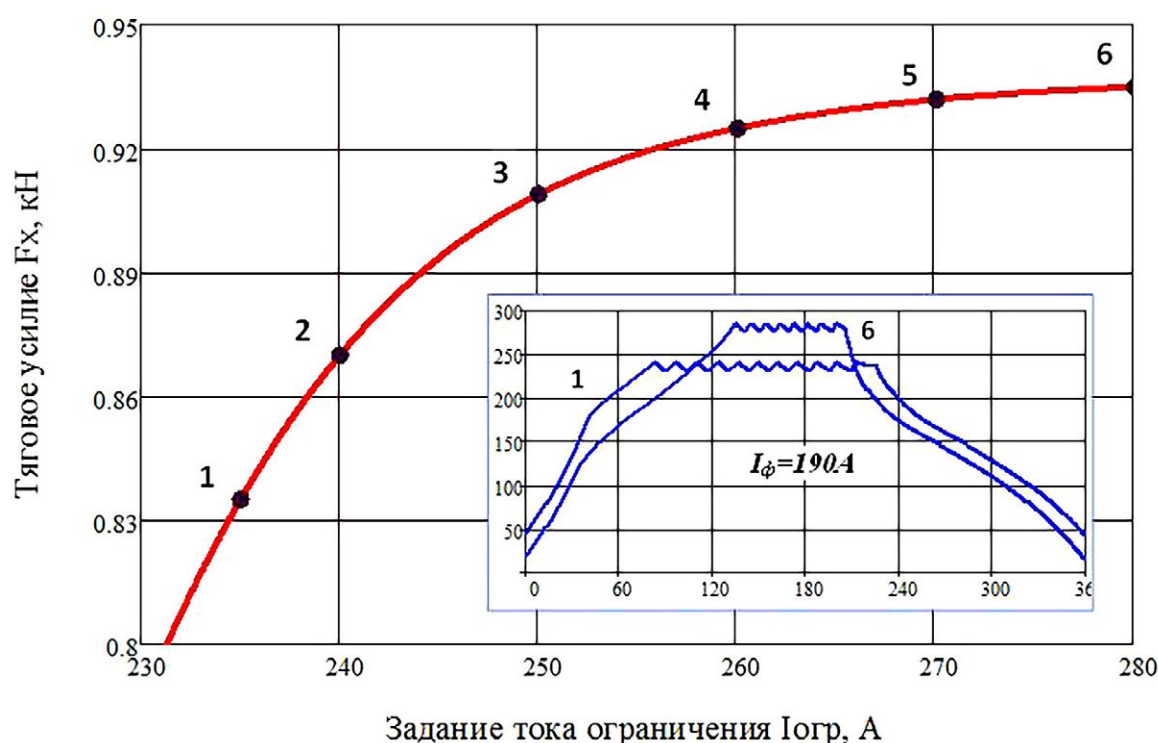


Рис. 8. График зависимости $F_x = f(I_{огр})$ при $I_\phi = 190 A$

Fig. 8. Graph of dependence $F_x = f(I_{огр})$ at $I_\phi = 190 A$

Из графика следует, что увеличение значения тока $I_{огр}$ сопровождается ростом тягового усилия F_x , при этом скорость изменения $\partial F_x / \partial I_{огр}$ уменьшается. Это делает не целесообразным увеличение $I_{огр} > 250 A$, так как незначительный прирост F_x создается за счет увеличения амплитуды тока, что снижает показатели надежности силового электрооборудования.

Таким образом, область допустимого управления согласно рис. 7 целесообразно ограничить линией, соответствующей $I_{огр} = 250 A$ (от точки «А» до точки «В»), и отрезком линии $I_\phi = 190 A$ (от точки 3 до точки 1).

Предложенный подход выбора параметров управления позволяет минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса. Это достигается за счет развязки внутренней динамики объекта путем введения ограничения $F_z = const$.

Для оценки тяговых возможностей модуля (при ограничении $F_z = 56 kN$) выполнены расчеты тягового усилия, создаваемого модулем в диапазоне скоростей $0 \leq V \leq 200$ км/ч, при $U_d = 800 V$, $\delta = 10$ мм, $I_{огр} = 250 A$. На рис. 9 показаны зависимости $F_{1x} = f(V)$, $I_{1\phi} = f(V)$, при ограничениях по мощности $P_{1x} = 21$ кВт; $F_{2x} = f(V)$, $I_{2\phi} = f(V)$ при ограничениях по току $I_\phi = 190 A$.

Из приведенных зависимостей следует, что при $V = 0$ км/ч в режиме левитации действующее значение фазного тока равно току продолжительного режима работы двигателя, а тяговое усилие, создаваемое модулем, имеет максимальное значение. При увеличении скорости до $V = 50$ км/ч значения токов $I_{2\phi}$, $I_{1\phi}$ синхронно увеличиваются и достигают значения часового режима $I_{\phi} = 190$ А. Сила тяги в указанном диапазоне скоростей линейно уменьшается. При дальнейшем увеличении скорости движения значение тока $I_{2\phi}$ ограничивается на достигнутом уровне, а значение тока $I_{1\phi}$ плавно уменьшается, обеспечивая режим движения с постоянной мощностью $P_{IX} = 21$ кВт, а при $V = 200$ км/ч достигает значения продолжительного режима работы. Примечательно, что при $V \geq 150$ км/ч сила тяги F_{2x} стабилизируется на значении $F_{2x} = 0,9$ кН, при этом мощность достигает значения $P_{2X} = 50$ кВт при $V = 200$ км/ч.

Таким образом, расчетные исследования показали, что в области допустимого управления при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса, реализуются тяговые возможности, заложенные при проектировании магнитной системы двигателя.

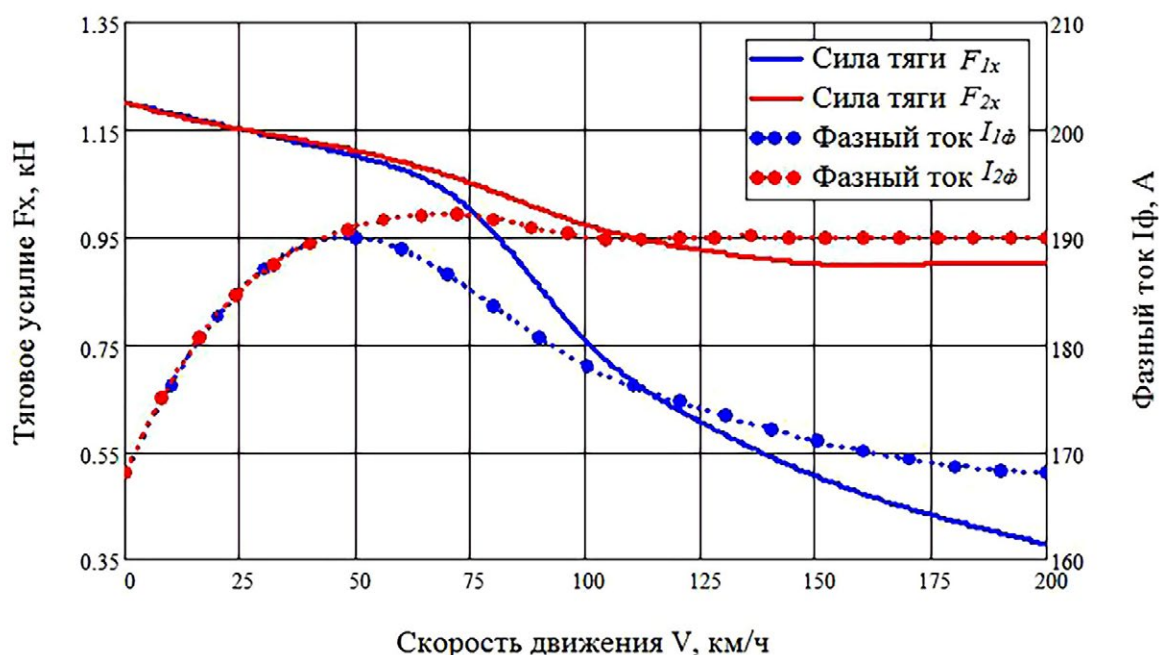


Рис. 9. Графики зависимостей силы тяги и фазного тока модуля от скорости

Fig. 9. Graphs of the dependences of traction force and phase current of the module on speed

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МАССЕ ГРУЗА

Условия работы грузовой транспортной платформы таковы, что масса груза, устанавливаемого на платформе, не имеет фиксированного значения. Кратность возможного изменения массы транспортной платформы M_{mn} с грузом M_{gp} может составлять примерно 2,4 раза. В этих условиях задачей управления линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, является обеспечение условия:

$$F_z = g(M_{mn} + M_{gp}), M_{gp} = var, \quad (9)$$

Если параметры управления заранее рассчитаны для заданной скорости движения и номинальной массы груза $M_{gp, nom}$, то выполнение условия (9) может быть достигнуто регулированием тока ограничения $I_{огр} = var$, при неизменных параметрах управления $\alpha = const$, $\Delta\beta = const$. Однако это ведет к снижению силы тяги. В свою очередь для коррекции значения силы тяги необходимо вводить в систему соответствующий контур регулирования, что существенно усложняет систему управления.

Как показали исследования это не единственный способ обеспечения выполнения условия (9). Магнитостатические исследования на 3D-модели двигателя выявили, что с ростом значения воздушного зазора δ одновременно наблюдается увеличение значения тяги F_x (при выполнении условия $F_z = const$). Физически это объясняется увеличением потоков рассеяния в магнитной системе. А, как известно, в реактивных индукторных машинах сила тяги образуется именно потоками рассеяния в торцевых частях магнитопровода [10]. Таким образом, коррекция значения силы тяги F_x при различной массе груза может быть достигнута заданием соответствующего значения воздушного зазора δ без изменения значений параметров управления.

Для демонстрации сказанного на рис. 10 приведены графики зависимостей тягового усилия, создаваемого модулем, от массы $F_{x1} = f(M)$, приходящейся на один модуль, а также графики зависимости фазного тока от массы $I_{\phi 1} = f(M)$. Зависимости получены для $V = 200$ км/ч при постоянных значениях параметров управления $I_{огр}$, α , $\Delta\beta$ и $\delta = var$. На графиках нанесены точки 1–7, в которых значения функций получены при зазорах $\delta_1 = 10$ мм ... $\delta_7 = 16$ мм. На рисунке также приведены аналогичные графики зависимостей $F_{x2} = f(M)$ и $I_{\phi 2} = f(M)$ (линии красного цвета),

полученные при постоянных значениях α , $\Delta\beta$, δ и $I_{огр} = var$. На графиках нанесены расчетные точки 1–13, в которых значения функций получены при $I_{огр1} = 250$ А, $I_{огр2} = 240$ А, $I_{огр3} = 230$ А, ... и т.д.

Таким образом, равновесное состояние системы магнитного подвеса (условие 9) при различной массе груза может быть достигнуто путем изменения величины воздушного зазора. Увеличение воздушного зазора (при неизменных параметрах управления) приводит к незначительному росту тягового усилия F_{x1} модуля при практически постоянном значении тока $I_{ф1}$. Тот факт, что значение тока $I_{ф1}$ остается практически постоянным свидетельствует о том, что электромагнитное состояние двигателя остается неизменным. Это позволяет предположить, что динамические характеристики двигателя как объекта управления также остаются неизменными.

В практическом плане идентификация массы груза может быть выполнена на стоянке после загрузки и перехода платформы в режим левитации с номинальным значением воздушного зазора. В этом режиме $\alpha = 0$, $\Delta\beta = 0$, а величина $I_{огр}$ будет соответствовать массе M платформы с грузом. При этом, если $I_{огр}$ окажется меньше значения, соответствующего номинальной массе груза $M_{гр.ном}$, то для коррекции

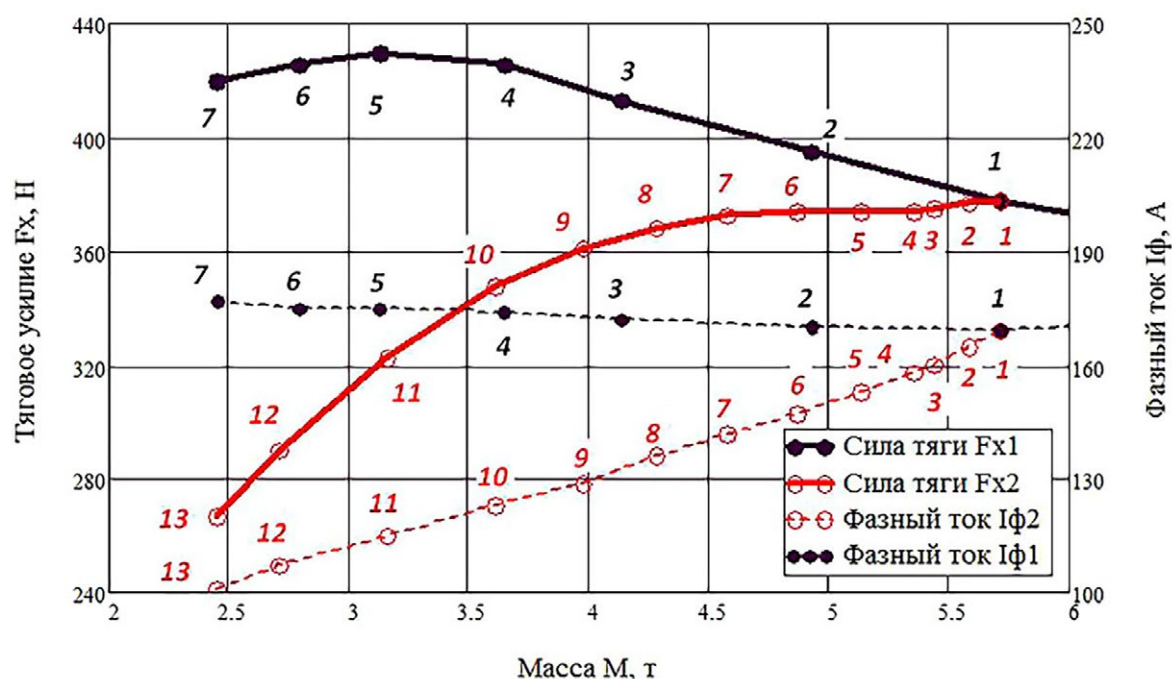


Рис. 10. Графики зависимостей силы тяги модуля и фазного тока от массы груза

Fig. 10. Graphs of module traction force and phase current versus load mass

тягового усилия должна быть выполнена коррекция величины воздушного зазора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса.

При попытке адаптации известных алгоритмов управления тягой вращающихся реактивных индукторных машин к управлению линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, выявлены проблемы достижения заданной подъемной силы на высоких скоростях. В результате расчетных исследований выявлена область управления двигателем, в которой формируется пульсирующий ток, существенно увеличивающий подъемное усилие двигателя. Режим работы двигателя с пульсирующим током не характерен для вращающихся машин данного класса, однако, его использование в двигателе совмещающим функции тяги и подвеса позволяет при высоких скоростях движения реализовать потенциал создания подъемной силы, заложенный при проектировании магнитной системы двигателя.

Исследовано влияние компонент управляющего воздействия на параметры двигателя. С учетом выявленного влияния предложен алгоритм управления, предусматривающий распределение компонент управляющего воздействия по каналам управления тягой и подвесом.

Предложен подход к выбору параметров управления, позволяющий минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса. Это достигается за счет развязки внутренней динамики объекта путем введения ограничения на постоянство подъемной силы.

Расчетные исследования на модели трехфазного тягово-левитационного модуля показали, что в области допустимого управления при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса, реализуются тяговые возможности, заложенные при проектировании магнитной системы двигателя.

Представлены результаты исследования тяговых возможностей двигателя при различной массе груза. Показано, что равновесное состояние системы магнитного подвеса при различной массе груза может быть достигнуто путем изменения величины воздушного зазора при неизменных параметрах управления.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании комбинированной системы управления тягой и магнитным подвесом грузовой транспортной платформы.

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. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, № 3. С. 23–33. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24125908_21159036.pdf EDN: UHYQDJ
2. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Развитие теории и создание новых конструкций индукторных машин // Известия вузов. Электромеханика. 2005. №2. С. 6–10. EDN: HSDBFF
3. Коломейцев Л.Ф., Бибииков В.И., Пахомин С.А. и др. Применение реактивных машин на транспорте // Известия вузов. Электромеханика. 2008. № 1. С. 67–70. EDN: KGCMBX
4. Смачный В.Ю., Шевкунова А.В., Смачный Ю.П. Применение вентильно-индукторного привода на транспорте // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4. С. 91–94. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825241_61149270.pdf EDN: YURPRJ
5. Киреев А.В. Вентильно-индукторные электроприводы для электроподвижного состава. Ростов-на-Дону: АкадемЛит, 2011. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://privod-n.ru/uslugi/publikatsii/monografiya/>
6. Никифоров Б.В., Пахомин С.А., Птах Г.К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов // Электричество. 2007. № 2. С. 34–38. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_70126473.pdf EDN: KUZZQX
7. Щербаков В.Г., Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Индукторный привод для электроподвижного состава // Локомотив. 2005. № 2. С. 36–37. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_97779061.pdf EDN: KUZZQX
8. Однокопылов Г.И., Розаев И.А., Брагин А.Д. и др. Сравнительный анализ отказоустойчивого управления асинхронного и вентильно-индукторного электропривода. В кн.: Интеллектуальные энергосистемы: труды

- IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., Томск: в 3 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 89–93. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36383/1/conference_tpu-2016-C43_V2_p89-93.pdf EDN: XVHBLB
9. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: МЭИ, 2003.
 10. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Инженерная методика проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя // *Электричество*. 2007. № 10. С. 24–32. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12840913_15448892.pdf EDN: KUZYIR
 11. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Предпосылки создания высокоскоростной контейнерной транспортной системы // *Транспортные системы и технологии*. 2017. Т. 4. № 10. С. 4–41. doi: 10.17816/transsyst2017345-41
 12. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А. и др. Транспорт с магнитным подвесом. М.: Машиностроение, 1991. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1491622757.pdf
 13. Киреев А.В. Грузовой подвижной состав на магнитном подвесе. Обзор разработок и перспективы развития // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. 2022. Т. 59. № 3. С. 23–29. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: http://ipem.ru/content/Дайджест/tzd_59_web.pdf
 14. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Электротехнический комплекс магнитолевитационного подвижного состава // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2021. Т. 7. № 3. С. 67–105. doi: 10.17816/transsyst20217367-105
 15. Киреев А.В. Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2004. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002667685> EDN: NHQHPB
 16. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Дата введения 2015-01-01. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2014. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774534.pdf>

REFERENCES

1. Ptakh GK. Switched reluctance drive medium and high power: foreign and domestic experience, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2015;2(3):23–33. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24125908_21159036.pdf EDN: UHYQDJ
2. Kolomeytsev LF, Pahomin SA. Development of the theory and the creation of new designs inductor machines. *Russian Electromechanics*. 2005;2:6–10. EDN: HSDBFF
3. Kolomeytsev LF, Bibikov VI, Pahomin SA, et al. The use of reactive transport of machines. *Russian Electromechanics*. 2008;1:67–70. EDN: KGCMBX
4. Smachnyy VYu, Shevkunova AV, Smachnyy YuP. Primeneniye ventil'no-induktornogo privoda na transporte. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo*

- universiteta putey soobshcheniya*. 2018;4:91–94. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825241_61149270.pdf EDN: YURPRJ
5. Kireyev AV. *Ventil'no-induktornyye elektroprirody dlya elektropodvizhnogo sostava* (monograph). Rostov-on-Don: AkademLit; 2011. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://privod-n.ru/uslugi/publikatsii/monografiya/>
 6. Nikiforov BV, Pakhomin SA, Ptakh GK. Ventil'no-induktornyye dvigateli dlya tyagovykh elektroprivodov. *Elektrichestvo*. 2007;2:34–38. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_70126473.pdf EDN: KUZZQX
 7. Shcherbakov VG, Kolomeytsev LF, Pakhomin SA. Switched reluctance drive for electric rolling. *Locomotive*. 2005;2:36–37. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_97779061.pdf EDN: KUZZQX
 8. Odnokopylov GI, Rozayev IA, Bragin AD, et al. Sravnitel'nyy analiz otkazoustoychivogo upravleniya asinkhronnogo i ventil'no-induktornogo elektropriroda. In: *Intellectualnye energosistemy: trudy IV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma, 10–14 October 2016, Tomsk. 3 Vols.* Tomsk: Izd-vo TPU; 2016;2:89–93. (In Russ.). [cited: 04.12.2023] Available from: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36383/1/conference_tpu-2016-C43_V2_p89-93.pdf EDN: XVHBLB
 9. Kuznetsov VA, Kuz'michev VA. *Ventil'no-induktornyye dvigateli*. Moscow: MEI; 2003. (In Russ.)
 10. Kuznetsov VA, Kuz'michev VA. Inzhenernaya metodika proyektirovaniya induktornoy mashiny dlya ventil'no-induktornogo dvigatelya. *Elektrichestvo*. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12840913_15448892.pdf EDN: KUZYIR
 11. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Prerequisites for the creation of a high-speed container transport system. *Transportation Systems and Technology*. 2017;4(10):4–41. doi: 10.17816/transsyst2017345-41
 12. Bakhvalov Yu.A., Bocharov VI, Vinokurov VA., et al. *Transport s magnitnym podvesom*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1991. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1491622757.pdf
 13. Kireyev AV. Gruzovoy podvizhnoy sostav na magnitnom podvese. Obzor razrabotok i perspektivy razvitiya. *Vestnik Instituta problem metallicheskih monopoliy: Tekhnika zheleznikh dorog*. 2022;59:23–29. (In Russ.). [cited: 04.12.2023] Available from: http://ipem.ru/content/Дайджест/tzd_59_web.pdf
 14. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Electrotechnical complex of maglev rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):67–105. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst20217367-105
 15. Kireev AV. Razrabotka algoritmov effektivnogo upravleniya tyagovym ventil'no-induktornym elektroprirodom elektropoyezda [dissertation]. Novocherkassk; 2004. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002667685> EDN: NHQHPB

16. GOST 2582-2013. Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. Moscow: STANDARTINFORM; 2014. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774534.pdf>

Сведения об авторах:

Киреев Александр Владимирович, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;

Email: akireev@privod-n.ru

Кожемяка Николай Михайлович, к.т.н.;

eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;

Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Кононов Геннадий Николаевич;

eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;

Email: gkononov@privod-n.ru

Information about the authors:

Alexander V. Kireev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;

Email: akireev@privod-n.ru

Nikolay M. Kozhemyaka, Candidate of Technical Sciences;

eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;

Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Gennady N. Kononov;

eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;

Email: gkononov@privod-n.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

УДК [UDC] 656

<https://doi.org/10.17816/transsyst624226>

© С.М. Шевченко, С.В. Алексеев, Д.И. Занин, А.Д. Занина,
Г.А. Аверченко

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ДОРОГАХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Обоснование. Основной задачей реализации Национального проекта «Безопасные качественные дороги» Российской Федерации является повышение безопасности и качества автомобильных дорог. В работе приведены обоснования методов устройства продольных шумовых полос и оценка их влияния на общую безопасность дорожного движения. Результаты исследования предполагается использовать для разработки эффективных рекомендаций по интеграции данных мероприятий в процессы проектирования и строительства автомобильных дорог.

Цель. Выбор и обоснование наиболее рационального способа устройства продольных шумовых полос на автомобильных дорогах. В настоящей статье проанализирована взаимосвязь между шумовой продольной полосой и частотой дорожно-транспортных происшествий; изучение связи между наличием шумовой полосы на дороге и частотой дорожно-транспортных происшествий. Результаты проведенного исследования позволяют оценить влияние шумовой полосы на изменение риска возникновения аварий и нарушений ПДД.

Методы. Рассмотрены различные участки концентрации дорожно-транспортных происшествий исходя из статистических данных по автомобильным дорогам технической категории, на которых реализованы мероприятия по устройству продольных шумовых полос, позволяющие провести анализ их эффективности. Выделены особенности и рекомендации работы продольных шумовых полос на вновь возведенных участках автомобильных дорог.

Результаты. Преимущество технологии устройства продольных шумовых полос на автомобильных дорогах на примере автомобильных дорог Северо-Западного региона для безопасности дорожного движения и экономической эффективности данного метода.

Ключевые слова: продольные шумовые полосы; безопасность дорожного движения; дорожное строительство; аварии; травмы; гибель; экономический ущерб; частота дорожно-транспортных происшествий; нарушения ПДД; статистические данные; участки автомобильных дорог; экономическая эффективность.

Как цитировать:

Шевченко С.М., Алексеев С.В., Занин Д.И., Занина А.Д., Аверченко Г.А. Технологические процессы обеспечения безопасности дорожного движения на дорогах Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 41–58. <https://doi.org/10.17816/transsyst624226>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

© S.M. Shevchenko, S.V. Alekseev, D.I. Zanin, A.D. Zanina,
G.A. Averchenko

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

TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR ENSURING ROAD SAFETY ON THE ROADS OF ST. PETERSBURG AND THE LENINGRAD REGION

Background. The main objective of the implementation of the National Project “Safe high-quality roads” of the Russian Federation is to improve the safety and quality of highways. This study provides a justification for the methods of installing longitudinal noise strips and an assessment of their impact on overall road safety. The results of this study can be used to develop effective recommendations for integrating these measures into the processes of designing and building highways.

Aim. The purpose of this study is to select and substantiate the most rational way of installing longitudinal noise strips on highways. This study analyzes the relationship between the longitudinal noise band and the frequency of traffic accidents. The main purpose of this study is to study the relationship between the presence of a noise lane on the road and the frequency of traffic accidents. This study evaluates the impact of the noise band on the change in the risk of accidents and traffic violations.

Methods. Various sections of the concentration of road accidents are considered on the basis of statistical data on highways of the technical category, on which measures have been implemented for the installation of longitudinal noise strips, allowing an analysis of their effectiveness. The features and recommendations regarding longitudinal noise strips on newly erected sections of highways are highlighted.

Results. Taking the highways in the North-Western region as an example, the technology of installing longitudinal noise strips on highways has a benefit for road safety and economic efficiency.

Keywords: deflection, double-support ferry, ice crossing, load-bearing capacity, design scheme, floating bridge.

To cite this article:

Shevchenko SM, Alekseev SV, Zanin DI, Zanina AD, Averchenko GA. Technological processes for ensuring road safety on the roads of St. Petersburg and the Leningrad region. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):41–58. <https://doi.org/10.17816/transsy624226>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности дорожного движения – краеугольный камень Национального проекта «Качественные безопасные дороги». Каждый год дорожно-транспортные происшествия приводят к травмам, смертельным исходам и значительному материальному ущербу. Следовательно, разработка и внедрение эффективных методов повышения безопасности дорожного движения приобретают все большее значение. Одним из таких методов является устройство продольных шумовых полос. В данном исследовании основное внимание в первую очередь мы обратили на влияние продольных шумовых полос на безопасность дорожного движения, установление взаимосвязи между наличием шумовых полос на дороге и частотой дорожно-транспортных происшествий, что поможет в разработке эффективных мер по снижению риска аварий и нарушений ПДД. Также были проанализированы преимущества и недостатки использования продольных шумовых полос с альтернативными вариантами, обеспечивающими безопасность дорожного движения и выбор наиболее рационального подход к их внедрению на автомобильных дорогах.

Целью данного исследования является выбор и обоснование с экономической точки зрения и оптимального метода устройства продольных шумовых полос на дорогах для повышения безопасности дорожного движения. В рамках исследования будут проанализированы преимущества и недостатки шумовых полос, изучена корреляция между их присутствием на дороге и частотой дорожно-транспортных происшествий, а также определены рекомендации по их эффективному использованию.

Выводы настоящего исследования послужат основой для разработки рекомендаций и достижения экономической эффективности при проектировании и устройстве продольных шумовых полос для повышения безопасности дорожного движения.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

В современном мире безопасность на дорогах является одной из главных проблем, с которой сталкиваются общество и государство. Каждый год аварии на дорогах приводят к тысячам травм и к гибели людей, а также наносят значительный экономический ущерб. Индикатором важности данного фактора для страны является принятие Национального проекта «Безопасные качественные дороги» (далее – БКД), в структуру

которого включен федеральный проект «Безопасность дорожного движения». В рамках проекта, разработка и использование эффективных средств для повышения безопасности на дорогах становится неотъемлемой задачей.

Обустройство автомобильных дорог должно быть тщательно спланировано и включать в себя как анализ мест ДТП, так и причин их возникновения. На дорогах необходимо реализовывать такие методы обустройства дорог, которые будут не только эффективными в предотвращении происшествий, но и расходовать минимальное количество финансовых средств и времени на их устройство.

Анализом исследовательских работ по вопросу безопасности дорожного движения с точки зрения формирования государственного мнения, понятий и правил, которые закладывают в общество идею о необходимости соблюдения ПДД, являются следующие тезисы из исследований [1, 2].

О.С. Рогачева [1] и А.И. Смоляков [2] в своих исследованиях приходят к выводу о том, что для обеспечения безопасности дорожного движения необходимо ужесточать административные наказания за правонарушения. Такие меры воздействия, считают авторы, позволят соблюдать требования ПДД и уменьшат количество нарушений, а значит, будут обеспечивать безопасность дорожного движения.

При этом, в настоящее время не каждое нарушение ПДД может быть зафиксировано автоматически, то есть для реализации мер по обеспечению безопасности, предлагаемых авторами, необходимо увеличивать число временных постов ГИБДД на дорогах, что также становится затратным мероприятием для бюджетов субъектов РФ. Последнее обстоятельство доказывает низкую экономическую эффективность указанного подхода.

Чтобы уменьшить в нашей стране количество несчастных случаев от дорожно-транспортных происшествий, считает И.Г. Михайловский в своей работе [3], следует осуществлять и реализовывать на дорогах такие мероприятия, которые способны с большой долей вероятности оградить участников дорожного движения от аварий.

Автор Е.В. Трунова обращает внимание в своем исследовании [4] на то, что в первую очередь владельцам автомобильных дорог необходимо осуществлять предотвращение и нейтрализацию возможных угроз наступления событий ДТП. То есть создавать, поддерживать и улучшать условия дорожного движения, отвечающие требованиям безопасности дорожного движения.

На основе этого можно резюмировать что, как правило, этот комплекс причин, действует в местах при ДТП и затрудняют оценку реальных значений отдельных составляющих причин. На обеспечение безопасности дорожного движения влияют факторы: объективные и субъективные. К объективным факторам относятся: состояние покрытия, конструктивные параметры, обустройство дорог сооружениями и средствами регулирования, время суток, время года. Субъективные факторы: нарушение участниками движения правил движения, состояние пешеходов, водителей, и пр. Так как на субъективные факторы повлиять очень сложно, значит необходимо сосредотачивать усилия на минимизации влияния на аварийность объективных факторов.

На уровне проектирования автомобильных дорог необходимо снижать вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий за счет правильной организации дорожного движения, с условием невысоких финансовых затрат на реализацию (то есть таких, которые будут вписываться в общий бюджет проводимых работ).

Для эффективной борьбы с происшествиями на дорогах необходимо реализовывать и применять такие мероприятия, которые будут устранять корень проблемы. Мероприятия должны быть направлены на факторы, из-за которых возникают ДТП. Такой подход предполагает планирование первоочередных мероприятий, которые будут способствовать эффективному обеспечению безопасности дорожного движения.

Одним из таких мероприятий, которое повышает безопасность дорожного движения и транспортных средств на автомобильных дорогах, осуществляется в рамках капитального ремонта, реконструкции, текущего ремонта и содержания автомобильных дорог, а также при проектировании устройства шумовых продольных и поперечных полос, которые оказывает значительное влияние на безопасность дорожного движения.

Шумовая полоса – это элемент обустройства либо на поверхности покрытия дороги, либо непосредственно в слое покрытий конструктивных элементов дороги, при наезде на которую водитель испытывает значительное шумовое и вибрационное воздействие, что привлекает внимание к неблагоприятной дорожной ситуации, вынуждающей водителя снижать скорость движения и повышать внимание (ГОСТ 33025–2014) [5, 6].

В зависимости от расположения на автодороге дорожные шумовые разметки подразделяются на следующие виды:

1. Поперечная шумовая полоса. Устанавливается в поперечном направлении автомобильной дороги, при этом высота над уровнем

- проезжей части составляет 5–10 мм. Край поперечной шумовой полосы должен иметь уклон по направлению движения транспорта.
2. Продольная шумовая полоса. Она устанавливается вдоль разделительной или краевой разметки проезжей части дороги. Ее устраивают на автодорогах шириной более 7 м, при этом они должны иметь краевые укрепительные полосы соответственно с «ДБН В.2.3-4:2015 Автомобильные дороги».

Краевая шумовая полоса наносится на укрепительную краевую полосу обочины и предназначена для предупреждения водителя о предстоящем съезде с полосы движения транспорта на обочину.

Осевая шумовая разметка наносится на центральной разделительной полосе по оси дороги, чтобы предупреждать водителей автотранспорта о выезде на встречную полосу.

Поперечные шумовые полосы обычно устанавливают: перед нерегулируемыми переходами для пешеходов, примыканиями и пересечениями; на участках высокой концентрации ДТП и при подъезде к ним; перед железнодорожными переездами, не имеющими шлагбаума; на отрезках автодорог радиус кривых, которых меньше нормативного; на участках автодорог с плохой видимостью; на крутых спусках и подъемах [7, 8].

Продольные шумовые полосы наносят в следующих случаях: на участках автодорог с запрещенным обгоном – по оси дороги; на краевых укрепительных полосках – по обочине дороги.

При рассмотрении поперечных шумовых полос необходимо отметить, что транспортное средство пересекает данный элемент дорожной разметки перпендикулярно расположению длинной части этой разметки, то есть у автомобиля два парных колеса, расположенные на одной оси, пересекают его одновременно. Пятно контакта шин этих колёс, то есть площадь соприкосновения колёс с дорожным покрытием, в какой-то момент будет находиться только на дорожной разметке. Это значит, что качество сцепления колеса транспортного средства с материалом устройства шумовой полосы должно обеспечивать безопасное дорожное движение [7, 8].

Анализ показывает, что самым низкозатратным мероприятием является обеспечение видимости автомобильной дороги на опасных участках, крутых поворотах, за счет полного удаления деревьев в опасной зоне. Валка деревьев на опасных участках не только имеет самую низкую стоимость, но и наибольший коэффициент снижения доли

аварийности ДТП, то есть такое мероприятие имеет наибольшее влияние на безопасность аварийно-опасного участка.

К низкозатратным мероприятиям также относятся работы по нанесению поперечных шумовых полос, которые звуками привлекают внимание водителей при их пересечении, а также нанесение краевой и осевых полос, которые позволяют лучше ориентироваться при повороте и не выезжать на встречные полосы.

Следующим по стоимости мероприятием является корректная установка дорожных знаков, которые заранее информируют водителя о приближении к аварийно-опасному участку и позволяют ему безопасно пройти поворот, при соблюдении правил дорожного движения и скоростного режима, который установлен дорожными знаками. Коэффициент снижения вероятности ДТП у этого мероприятия показывает, что его выполнение имеет значительное влияние на безопасность дорожного движения. Главное достоинство этого мероприятия заключается в том, что количество знаков, а соответственно и стоимость проведения указанных работ не изменяется в зависимости от протяженности опасного участка, поворота. Значит, стоимость остается на фиксированном уровне.

Коэффициент снижения аварийности для продольных шумовых полос выбран идентично мероприятию по нанесению дорожных разметок, его реальное значение не исследовано. Продольные шумовые полосы, нанесенные на дорожное полотно методом фрезерования, помогают водителю транспортного средства держать полосу движения даже в условия недостаточной видимости. Поэтому можно сделать вывод о том, что коэффициент снижения вероятности доли ДТП у этого элемента обустройства выше.

Наибольшая стоимость мероприятия на 0,01 долю вероятности снижения ДТП – это установка барьерного ограждения. Такая удельная стоимость получилась из-за того, что сам коэффициент влияния небольшой, то есть незначительно снижает вероятность ДТП с пострадавшими. Назначать это мероприятие необходимо с учетом прочих факторов.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ШУМОВЫХ ПОЛОС НА СНИЖЕНИЕ ДТП

Для полноценной оценки мероприятий, обеспечивающих безопасное прохождение опасных участков, крутых поворотов, необходимо определить реальное значение коэффициента снижения вероятности количества ДТП для продольных шумовых полос, который отсутствует

в ОДМ 218.4.004–2009 «Руководство по устранению и профилактике возникновения участков концентрации ДТП при эксплуатации автомобильных дорог» [9]. Повсеместно в России продольные шумовые полосы активно стали применяться с 2012 года, а отраслевой документ разработан в 2009 году, этим объясняется отсутствие в нем необходимого коэффициента.

Документ разрабатывался ФГУП «РОСДОРНИИ» (в настоящее время ФАУ «РОСДОРНИИ») по заказу ФДА «Росавтодор», методика расчета коэффициентов в документе не представлена, в связи с чем в адрес ФАУ «РОСДОРНИИ» было направлено обращение с просьбой предоставления методики расчета коэффициентов, для проведения анализа влияния шумовых продольных полос на безопасность. ФАУ «РОСДОРНИИ» в своем ответе указали, что коэффициенты были рассчитаны методом «до» и «после», порядок которого раскрыт в пункте 7 ОДМ 218.6.025–2017 «Методические рекомендации по выбору эффективных некапиталоемких мероприятий по снижению аварийности в местах концентрации дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах общего пользования» [10].

Для проведения анализа необходимы данные о количестве ДТП на участках автомобильных дорог, на которых были реализованы изучаемые мероприятия «до» и «после» их реализации.

Предоставленная информация ФКУ «Управление Федеральных Автомобильных Дорог «Северо-Запад» им. Н.В. Смирнова Федерального дорожного агентства». На пяти автомобильных дорогах федерального значения: Р-21 «Кола» Санкт-Петербург – Петрозаводск – Мурманск – Печенга – граница с Королевством Норвегия на участке км 12+230 – км 260+778 (далее – Р-21 «Кола»), А-121 «Сортавала» Санкт-Петербург – Сортавала – автомобильная дорога Р-21 «Кола» на участке км 0+335 – км 143+790 (далее – А-121 «Сортавала»), Р-23 Санкт – Петербург – Псков – Пустошка – Невель – граница с Республикой Белоруссия на участке км 31+368 – км 178+878 (далее – Р-23), А-180 «Нарва» Санкт-Петербург – граница с Эстонской Республикой на участке км 31+440 – км 148+402 (далее – А-180 «Нарва»), М-10 «Россия» Москва – Тверь – Великий Новгород – Санкт-Петербург на участке км 593+600 – км 674+150 (далее – М-10 «Россия») в июле 2020 года произведено (на некоторых участках) нанесение продольных шумовых полос.

Для анализа необходимо взять примерно равные временные рамки до и после реализации мероприятий, так как все мероприятия реализованы в июле 2020 года, то для анализа достаточно оценить динамику

изменения количества ДТП за 4 года: 2019, 2020, 2021, 2022 год. Таким образом данные делятся на два периода: 2019 год + 7 месяцев 2020 года (с января по июль) = 19 месяцев «до» и 5 месяцев 2020 года (с августа по декабрь) + 2021-22 год = 29 месяцев «после» нанесения шумовых полос. Для наглядности в таблицах синим цветом указан период «ДО», а желтым – «ПОСЛЕ». Также в данных, предоставленных ФКУ УПРДОР «Северо-Запад» присутствуют дорожно-транспортные происшествия вида «Наезд на пешехода» или «Наезд на велосипедиста», данные виды ДТП не могут быть предотвращены шумовой полосой, поэтому такие ДТП не будут учтены в дальнейшем анализе, в таблицах такие виды ДТП выделены красным.

По данным, полученным от Федерального казенного учреждения «Управление Федеральных Автомобильных Дорог «Северо-Запад» имени Н. В. Смирнова Федерального дорожного агентства», производим оценку эффективности мероприятий методом «До» и «ПОСЛЕ», в соответствии с 7 пунктом ОДМ 218.6.025–2017 «Методические рекомендации по выбору эффективных некапиталоемких мероприятий по снижению аварийности в местах концентрации дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах общего пользования» [10].

Оценка эффективности мероприятий (в общем случае) в долях определяют по расчету показателя аварийности по формуле 1 из п. 7.2 [10]:

$$K_D^{\text{эф}} = \frac{\Delta D}{D}, \quad (1)$$

где D – количество ДТП в период «до», шт.; ΔD – разница между количеством ДТП в период «до» и «после», шт.; Так как в нашем случае период «до» больше, чем период «после» («до» – 19 месяцев, «после» — 29 месяцев), то для определения количества ДТП «до» необходимо воспользоваться формулой 2 из п.7.4 [10]:

$$D^1 = D_{\text{до}} \cdot N_{\text{ни}} \cdot \frac{B_{\text{ни}}}{N_{\text{ди}} \cdot B_{\text{ди}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{до}}$ – количество ДТП в период «до»; $N_{\text{ди}}$ и $N_{\text{ни}}$ – интенсивность движения соответственно «до» и «после»; $B_{\text{ди}}$ и $B_{\text{ни}}$ – число месяцев соответственно «до» и «после».

Для расчета показателя необходимы данные об интенсивности движения на участках федеральных автомобильных дорог, приведенные на официальном сайте ФКУ УПРДОР «Северо-Запад».

На портале данные представлены по месяцам, для анализа необходимо усреднить интенсивность. Среднесуточная интенсивность движения за определенный период времени определяется по п. Ж.3 ГОСТ 32965–2014. «Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока» [11].

Объединяя формулы 1 и 2, получаем для определения эффективности мероприятия необходимо использовать формулу:

$$K_D^{\text{эф}} = \frac{\Delta D}{D^1} \quad (3)$$

Все расчеты по количеству пострадавших, раненых, погибших и количеству ДТП: Максимальный коэффициент аварийности получился при анализе количества раненых – 0,705, минимальный при рассмотрении погибших – 0,279. Показатель аварийности по пострадавшим и количеству ДТП равны соответственно 0,656 и 0,607. Для экономической оценки рассматривался показатель по количеству ДТП, соответственно для расчета принимаем значение получившиеся по количеству ДТП (0,607).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОВЫХ ПОЛОС

Произведем графическую интерпретацию результата эффективности выполненных мероприятий, для этого воспользуемся диаграммой разброса, принятой в системе контроля качества [12].

Для построения данной диаграммы вводятся две переменные: независимая переменная характеристика, называемая аргументом «х», и зависимая переменная, называемой функцией (откликом) «у».

В табл. приведены показатели аварийности на 20 участках федеральных автомобильных дорог до мероприятий по устройству на них продольных шумовых полос и после реализации мероприятий.

Требуется выяснить влияние шумовой полосы на участках автомобильных дорог «до» и «после» ее реализации.

По полученным данным построен график в координатах (х-у). Длина осей графика равна разности максимальных и минимальных значений (х и у). Расположение точек показывает наличие и характер связи между статистическими данными ДТП на участках дорог «до» и «после» мероприятий по устройству шумовых полос. Результаты представлены на диаграмме разброса эффективности действий продольных шумовых

полос на автомобильной дороге за 2021 и 2022 года, точки, которые лежат на биссектрисе (желтая линия см. рис. 1 и 2), отражают место, где проведенное мероприятие никак не отразилось на безопасности движения и количество ДТП на участке не изменилось после нанесения шумовых полос. Точки, лежащие ниже биссектрисы показывают, что значения параметра качества за прошедшее время уменьшилось, если точки лежат выше биссектрисы, то значения параметра за рассматриваемое время возросли.

Таблица. Показатели аварийности (по ДТП) на участках автомобильных дорог с продольными шумовыми полосами

Table. Accident rates (accidents) on sections of roads with longitudinal noise stripes

№ Автомобильной дороги	№ участка дороги	Протяженность участка, м	До нанесения шумовых полос		После нанесения шумовых полос за 2021 год		После нанесения шумовых полос за 2022 год	
			Количество ДТП	ДТП на 1 км (x)	Количество ДТП	ДТП на 1 км (y)	Количество ДТП	ДТП на 1 км (y)
А-121	1	550	4	7,3	8	14,5	8	14,5
	2	2000	3	1,5	7	3,5	8	4
	3	870	0	0	2	2,3	3	3,4
	4	2000	4	2	1	0,5	1	0,5
	5	1128	7	6,2	0	0	0	0
	6	1490	1	0,7	2	1,3	2	1,3
	7	1237	7	5,7	2	1,6	2	1,6
	8	875	1	1,1	0	0	0	0
Р-21	9	1000	3	3	4	4	4	4
	10	1000	8	8	2	2	2	2
	11	1000	3	3	0	0	1	1
Р-23	12	1000	8	8	3	3	3	3
	13	1500	4	2,7	2	1,3	3	2
	14	1000	5	5	4	4	4	4
	15	1000	3	3	1	1	1	1
	16	800	6	7,5	0	0	0	0
	17	1000	3	3	0	0	0	0
А-180	18	400	2	5	0	0	1	2,5
	19	400	2	5	1	2,5	1	2,5
М-10	20	500	3	6	0	0	0	0

Диаграмма разброса эффективности действия продольных шумовых полос на автомобильной дороге представлена на рис. 1, 2.

Анализ диаграммы показывает, что в пятнадцати случаях нанесение продольных шумовых полос показало свою эффективность в сокращении количества ДТП, в пяти случаях был отмечен рост количества ДТП, не на одном из участков эффективность мероприятия не была нулевой. Размах положительной эффективности мероприятий был более 30%, а в семи случаях достигал 100%.

Резюмируя данные полученные в исследовании по вопросу эффективности продольных шумовых полос можно сделать вывод о том, что устройство на поверхности дорожного полотна продольных шумовых полос способствует снижению аварийности на участках и повышает уровень безопасности на автомобильных дорогах примерно на 75%

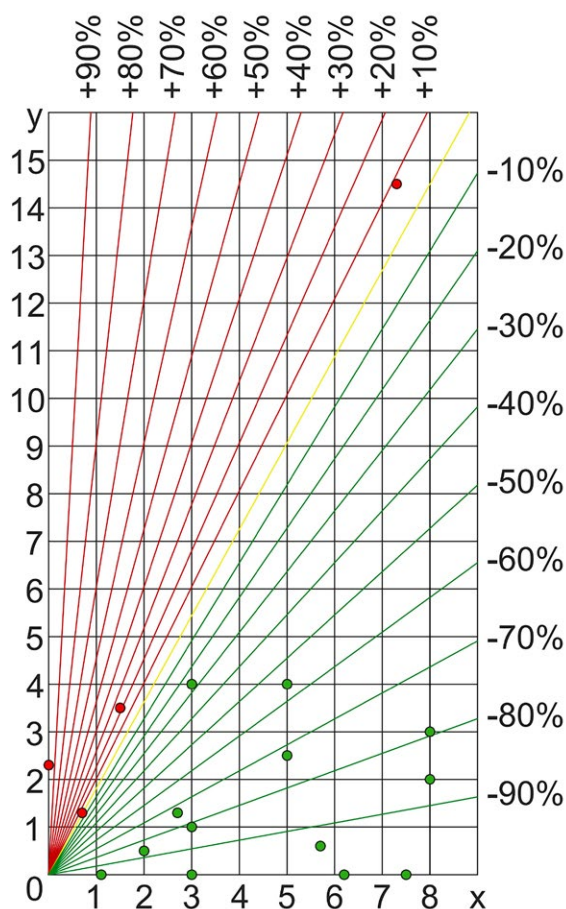


Рис. 1. Диаграмма разброса эффективности действия продольных шумовых полос на автомобильной дороге за 2021 год

Fig. 1. Scatter diagram of the effectiveness of longitudinal noise strips on a highway for 2021

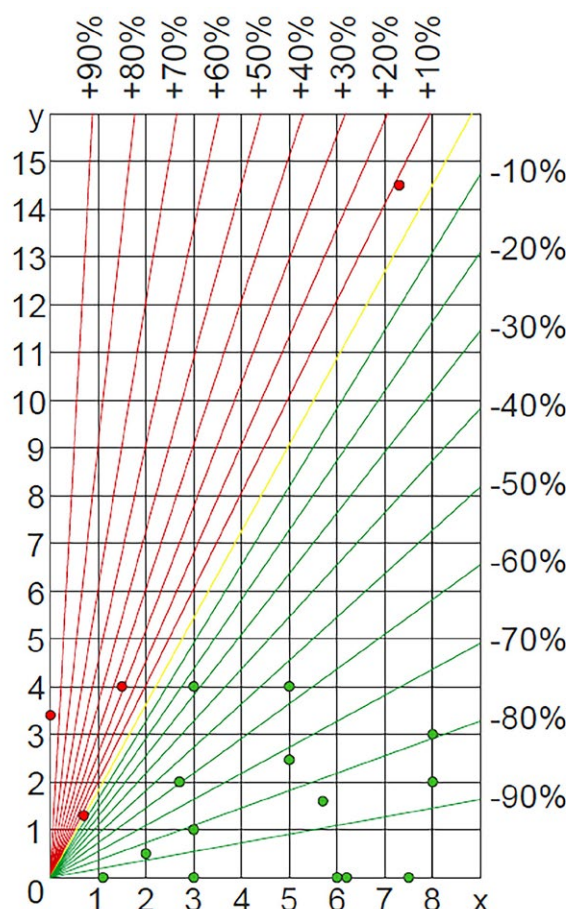


Рис. 2. Диаграмма разброса эффективности действия продольных шумовых полос на автомобильной дороге за 2022 год

Fig. 2. Scatter diagram of the effectiveness of longitudinal noise strips on a highway for 2022

показатель за 2021 год и 84% показатель за 2022 год (в пятнадцати случаях из двадцати мероприятие показало свою эффективность).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен сбор и анализ нормативной базы и исследований в области безопасности дорожного движения на опасных участках и крутых поворотах автомобильных дорог г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области за 2019–2022 гг.

В исследование были рассмотрены основные мероприятия, уменьшающие коэффициент аварийности на опасных участках и крутых поворотах. Все выбранные мероприятия рассмотрены с учетом экономической эффективности и влияния их на безопасность дорожного движения. Выяснено, что в нормативной базе недостаточно информации

о влиянии продольных шумовых полос, отсутствуют доли снижения коэффициента аварийности.

Исследование показало, что немногими в совокупности эффективными и низкозатратными применяемыми мероприятиями являются: обеспечение видимости в плане на опасных участках и крутых поворотах, устройство продольных и поперечных шумовых полос, а также разметка проезжей части, но стоимость этих работ зависит от протяженности аварийно-опасного участка.

По результатам исследования вопроса эффективности применения шумовых полос, стало ясно, что использование на автомобильных дорогах данного мероприятия, значительно повышает безопасность на аварийно-опасных участках и крутых поворотах. Для максимального снижения вероятности дорожно-транспортных происшествий необходимо выполнять требуемые мероприятия в комплексе.

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. Рогачева О.С. Эффективность норм административно-деликтного права. Воронеж: ВГУ, 2011. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: http://www.law.vsu.ru/structure/admlaw/books/rogacheva_effect_norm.pdf
2. Смоляков А.И., Барышников М.В. Профилактика нарушений правил дорожного движения: актуальные проблемы и возможные пути их решения // Научный портал МВД России. 2016. № 4(36). С. 56–61. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_28367844_49459817.pdf EDN: XWUCRF
3. Михайловский И.Г. Административная правосубъектность государственной инспекции безопасности дорожного движения в сфере правоохранительной деятельности: дисс. ... канд. юр. наук. Хабаровск, 2009. EDN: QEHDPJ
4. Трунова Е.В., Мититаниди П.О. Обеспечение безопасности дорожного движения как основная задача государственной инспекции безопасности дорожного движения // Евразийский юридический журнал. 2018. № 6(121). С. 153–155. EDN: XRTHTN
5. Жуков В.И., Копылов С.В. Проектирование городских улиц и дорог. Красноярск: СФУ, 2014.

6. Ермошин Н.А., Алексеев С.В. Нормативно-правовые проблемы заблаговременной подготовки автомобильных дорог в интересах обеспечения военной безопасности государства // Национальные приоритеты России. Серия 1: Наука и военная безопасность. 2015. № 2 (2). С. 9–13. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27117556_15365121.pdf EDN: WVKTHF
7. Малиновский М.П., Журавлева А.Ю. О несостоятельности некоторых способов снижения аварийности на пешеходных переходах // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2016. № 4 (10). С. 10. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/321?locale=ru_RU EDN: XILWDR
8. Коптилов В.А. Шумовые полосы // Техника и технология транспорта. 2019. № 11. С. 11. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-11PTC19.pdf> EDN: MURRMN
9. Распоряжение Росавтодора №260-р от 21.07.2009 «Об издании и применении ОДМ 218.4.004–2009 «Руководство по устранению и профилактике возникновения участков концентрации ДТП при эксплуатации автомобильных дорог»». [Rasporyazhenie Rosavtodora №260-r ot 21.07.2009 Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/6626967/>
10. ОДМ 218.6.025–2017 «Методические рекомендации по выбору эффективных некапиталоемких мероприятий по снижению аварийности в местах концентрации дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах общего пользования». Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-iles/odm2186025-2017.pdf>
11. ГОСТ 32965–2014. Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Методы учета интенсивности движения транспортного потока. Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200132267>
12. Пепина Л.А., Шевченко С.М., Алексеев С.В. Влияние шумовой продольной полосы на безопасность дорожного движения // Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. № 2 (2). С. 135–137. EDN: QDZJCW
13. Лазарев Ю.Г., Медрес Е.Е. Предложения по выявлению и сокращению опасных участков концентрации дорожно-транспортных происшествий // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2016. № 3 (37). С. 56–60. Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28156685_41660897.pdf EDN: XSDZAF
14. Васильев К.А., Аверченко Г.А. Замечания по развитию метода предельных состояний в области металлических конструкций // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 20–33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33
15. Баканов К.С., Гайнетдинов Т.Ш. Оценка вклада федеральных проектов в достижение целевого показателя снижения смертоносности в ДТП // Современная наука. 2020. № 2. С. 18–22. doi: 10.53039/2079-4401.2020.2.2.005

16. Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» №196-ФЗ от 10.12.1995. Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8585/
17. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». [Nacional'nyj proekt «Bezopasnye kachestvennye dorogi». [internet]. Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://bkdrf.ru/>

REFERENCES

1. Rogacheva OS. *Effektivnost' norm administrativno-deliktnogo prava*. Voronezh: VGU; 2011. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: http://www.law.vsu.ru/structure/admlaw/books/rogacheva_effect_norm.pdf
2. Smolyakov AI, Baryshnikov MV. Profilaktika narushenij pravil dorozhnogo dvizheniya: aktual'nye problemy i vozmozhnye puti ih resheniya. *Nauchnyj portal MVD Rossii*. 2016;4(36):6–61. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_28367844_49459817.pdf EDN: XWUCRF
3. Mihajlovskij IG. Administrativnaya pravosub"ektnost' gosudarstvennoj inspekcii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v sfere pravoohranitel'noj deyatel'nosti [dissertation] Khabarovsk; 2009. (In Russ.) EDN: QEHDPI
4. Trunova EV, Mititanidi PO. Obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya kak osnovnaya zadacha gosudarstvennoj inspekcii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. *Evrasijskij yuridicheskij zhurnal*. 2018;6(121):153-155 (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35172428>
5. Zhukov VI, Kopylov SV. Proektirovanie gorodskih ulic i dorog: uchebno-metodicheskoe posobie. Krasnoyarsk: SFU; 2014. (In Russ.)
6. Ermoshin NA, Alekseev SV. Normativno-pravovye problemy zablagovremennoj podgotovki avtomobil'nyh dorog v interesah obespecheniya voennoj bezopasnosti gosudarstva. *Nacional'nye priority Rossii. Seriya 1: Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2015;2(2):9-13. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27117556_15365121.pdf EDN: WVKTHF
7. Malinovskij MP, Zhuravleva AYU. O nesostoyatel'nosti nekotoryh sposobov snizheniya avarijnosti na peshekhodnyh perekhodah. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2016;4(10):10. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: https://www.adi-madi.ru/madi/article/view/321?locale=ru_RU
8. Koptilov VA. SHumovye polosy. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*. 2019;11:11. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <http://transport-kgasu.ru/files/N11-11PTC19.pdf> EDN: MURRMN
9. Rasporyazhenie Rosavtodora №260-r 21.07.2009 “Ob izdanii i primenении ODM 218.4.004–2009 “Rukovodstvo po ustraneniю i profilaktike vozniknoveniya uchastkov koncentracii DTP pri ekspluatácii avtomobil'nyh dorog”. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/6626967/>
10. ODM 218.6.025–2017 “Metodicheskie rekomendacii po vyboru effektivnyh nekapitaloemkikh meropriyatij po snizheniyu avarijnosti v mestah koncentracii dorozhno-transportnyh proisshestvij na avtomobil'nyh dorogah obshchego

- pol'zovaniya" (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-iles/odm2186025-2017.pdf>
11. Mezghosudarstvennyj standart. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Metody ucheta intensivnosti dvizheniya transportnogo potoka. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200132267>
 12. Pepina LA, Shevchenko SM, Alekseev SV. Vliyanie shumovoj prodol'noj polosy na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya. *Nedelya nauki ISI. Sbornik materialov Vserossijskoj konferencii*. 2022;2(2):135-137. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qdzjcw> EDN: QDZJCW
 13. Lazarev YuG, Medres EE. Predlozheniya po vyyavleniyu i sokrashcheniyu opasnyh uchastkov koncentracii dorozhno-transportnyh proisshestvij. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2016;3(37):56–60. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28156685_41660897.pdf EDN: XSDZAF
 14. Vasilev KA, Averchenko GA. Remarks on the development of the limit state method in the field of metal structures. *Transportation Systems and Technology*. 2023;9(1):20–33. doi: 10.17816/transsyst20239120-33
 15. Bakanov KS, Gainetdinov TSh. Assessment of the contribution of federal projects to achieving the target of reducing the fatality rate in road accidents. *Modern science*. 2020;2:18-22. doi: 10.53039/2079-4401.2020.2.2.005
 16. Federal'nyj zakon «O bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya» №196-FZ ot 10.12.1995. (In Russ.) [cited: 29.11.2023] Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8585/
 17. Nacional'nyj proekt «Bezopasnye kachestvennye dorogi» [internet] [cited: 29.11.2023] Available from: <https://bkdrf.ru/> (In Russ.)

Сведения об авторах:

Шевченко Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;

E-mail: shef10b@yandex.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент;

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

E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Занин Даниил Игоревич, студент;

ORCID: 0000-0002-3607-5747;

E-mail: zanin.d.i@yandex.ru

Занина Анна Дмитриевна, ассистент;

eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0003-3629-5376;

E-mail: anna.pavlenko.1996@yandex.ru

Аверченко Глеб Александрович, старший преподаватель;

eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;

E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Information about the authors:

Sergey M. Shevchenko, Candidate of Sciences in Engineering, associate professor;
eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;
E-mail: shef10b@yandex.ru

Sergey V. Alekseev, Candidate of Sciences in Engineering, associate professor;
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Daniil I. Zanin, student;
ORCID: 0000-0002-3607-5747;
E-mail: zanin.d.i@yandex.ru

Anna D. Zanina, assistant;
eLibrary SPIN: 5456-2574; ORCID: 0000-0003-3629-5376;
E-mail: anna.pavlenko.1996@yandex.ru

Gleb A. Averchenko, senior lecturer;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК 621.311

<https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

© И.Д. Карабаджак, В.В. Никитин

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ВАРИАНТЫ СТРУКТУРЫ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С БАТАРЕЕЙ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обоснование. В последние годы резко возрос интерес к проблеме сокращения выброса продуктов сжигания углеводородного топлива в атмосферу и использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии. Данная проблема является актуальной как для стационарной, так и для транспортной энергетики. Одним из путей снижения вредного воздействия на окружающую среду первичных источников энергии в автономных транспортных энергоустановках является их гибридизация, т.е. использование наряду с традиционными источниками энергии (турбогенераторами и дизель-генераторами) водородных источников электроэнергии (батарей топливных элементов).

Цель. Обоснование оптимального варианта структуры автономной электро-энергетической системы с комбинированной энергоустановкой на основе водородных источников электроэнергии.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели использован сравнительный анализ параметров и характеристик элементов энергосистемы, а также метод моделирования процессов в исследуемой энергосистеме с использованием пакета MATLAB Simulink. Рассматриваются два варианта структуры автономной электроэнергетической системы – с общей шиной переменного и постоянного тока. Анализ параметров и характеристик этих вариантов выполнен для трех типовых режимов работы: включения статической нагрузки, прямого пуска асинхронного двигателя с нагрузкой на валу и перевода потребителей с питания от дизель-генератора на питание от батареи водородных топливных элементов.

Результаты. Во всех рассматриваемых режимах батарея ВТЭ характеризуется быстрым откликом на изменение нагрузки и стабильным КПД. Характер переходных процессов апериодический или малоколебательный, быстро затухающий. По количеству полупроводниковых преобразователей, фильтрующих устройств и их суммарной мощности более предпочтительной является структура автономной энергосистемы с общей шиной переменного тока.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система; водородный топливный элемент.

Как цитировать:

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. <https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© I.D. Karabadzhack, V.V. Nikitin

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

OPTIONS FOR THE STRUCTURE OF AN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEM WITH A BATTERY OF HYDROGEN FUEL CELLS

Background. Recently, interest in the problem of reducing the emissions of hydrocarbon fuel combustion products into the atmosphere and the use of alternative and renewable energy sources has sharply increased. This problem is relevant to both stationary and transport energy. One of the ways to reduce the harmful impact of primary energy sources in autonomous transport power plants on the environment is their hybridization, i.e., use, along with traditional energy sources (turbogenerators and diesel generators), of hydrogen sources of electricity (fuel cell batteries).

Aim. This study presents a justification of the optimal variant of the structure of an autonomous electric power system with a combined power plant based on hydrogen sources of electricity.

Materials and Methods. To achieve this goal, a comparative analysis of the parameters and characteristics of the power system elements was performed, as well as a method for modeling processes in the power system under study using the MATLAB Simulink package. Two options for the structure of an autonomous electric power system are being considered, namely, a common AC and DC bus. An analysis of the parameters and characteristics of these options was performed for three typical operating modes, namely, turning on a static load, direct starting of an asynchronous motor with a load on the shaft, and transferring consumers from power from a diesel generator to power from a battery of hydrogen fuel cells.

Results. In all considered modes, the VTE battery is characterized by a rapid response to load changes and stable efficiency. The nature of transient processes is aperiodic or low oscillatory, rapidly decaying. In terms of the number of semiconductor converters, filtering devices, and their total power, the structure of an autonomous power system with a common AC bus is more preferable.

Keywords: autonomous electric power system, hydrogen fuel cell.

To cite this article:

Karabadzhack ID, Nikitin VV. Options for the Structure of an Autonomous Electric Power System with a Battery of Hydrogen Fuel Cells. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2024;10(1):59–75. <https://doi.org/10.17816/transsyst624890>

ВВЕДЕНИЕ

Энергоустановки, использующие водород в качестве топлива, являются весьма перспективными источниками энергии, поскольку принципиально позволяют сочетать высокую энергетическую эффективность с сокращением вредных выбросов в атмосферу. Энергия, получаемая при сжигании одного килограмма угля, составляет 34 МДж/кг, для дизельного топлива этот показатель составляет 43 МДж/кг, а для водорода – 120 МДж/кг [1].

В последние два десятилетия интерес к созданию источников электрической энергии с использованием водородных топливных элементов резко возрос; это направление энергетики активно развивается как в сфере разработки стационарных объектов большой и малой энергетики, так и в транспортной сфере. В частности, для крупных транспортных объектов (судов, подвижного состава железных дорог) разработаны и проходят опытную эксплуатацию водородные источники электрической энергии на уровне мощностей в несколько сотен кВт [2–8].

Для энергообеспечения тяговых и вспомогательных нужд автономного моторвагонного подвижного состава в настоящее время используются преимущественно дизельные первичные источники энергии. Ведутся также перспективные разработки гибридного подвижного состава, где в качестве источников энергии используются тяговая аккумуляторная батарея и водородные источники энергии – топливные элементы (ВТЭ). По технико-экономическим оценкам ведущих мировых компаний-производителей железнодорожного подвижного состава затраты на эксплуатацию, пробег между заправками топливом (около 1000 км) и время заправки при пустых баках (около 15 минут) моторвагонного поезда с ВТЭ практически сопоставимы с аналогичными показателями для дизель-поезда. Однако, затраты на организацию необходимой инфраструктуры для заправки подвижного состава водородом более высокие. Для моторвагонных поездов, привод которых питается от тяговых аккумуляторных батарей, затраты на инфраструктуру ниже. Тем не менее, недостаточно высоки показатели пробега между подзарядками батареи (до 200 км), массы и времени зарядки бортовых систем хранения энергии (30–35 тонн и 45 минут соответственно) [9–12].

При разработке автономных электроэнергетических систем с водородными источниками энергии одной из первых задач, подлежащих решению, является задача обоснования структуры энергосистемы.

СТРУКТУРА АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОДОРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим автономную электроэнергетическую систему (АЭЭС) транспортного или стационарного исполнения, которая включает в себя основной источник энергии в виде дизель-генераторного агрегата, вырабатывающего энергию трехфазного переменного тока, и вспомогательный источник энергии в виде батареи ВТЭ, вырабатывающий энергию постоянного тока. Потребителями энергии в рассматриваемой системе будут приняты асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (за прототип принят двигатель серии 5А200М4) и статическая нагрузка активно-индуктивного характера. Основные технические характеристики источников и потребителей электрической энергии, входящих в структуру рассматриваемой АЭЭС, представлены в табл. 1.

Поскольку источники энергии в АЭЭС генерируют энергию разного рода тока, для согласования параметров питания потребителей в составе АЭЭС необходимо использование полупроводниковых преобразователей [13–15]. Варианты структуры АЭЭС с общей шиной постоянного и переменного тока представлены на рис. 1.

Таблица 1. Характеристики источников и приемников электрической энергии, входящих в состав рассматриваемой АЭЭС

Table 1. Characteristics of sources and receivers of electrical energy that are part of the considered autonomous electric power system

Параметр	Ед.изм.	Величина
Источники энергии		
Мощность синхронного генератора	кВт	100
Линейное напряжение синхронного генератора	В	400
Мощность батареи топливных элементов	кВт	100
Выходное напряжение батареи топливных элементов при номинальной мощности	В	400
Потребители энергии		
Мощность асинхронного двигателя на валу	кВт	37
КПД асинхронного двигателя	–	0,92
Коэффициент мощности асинхронного двигателя	–	0,85
Мощность статической нагрузки	кВА	30
Коэффициент мощности статической нагрузки	–	0,8

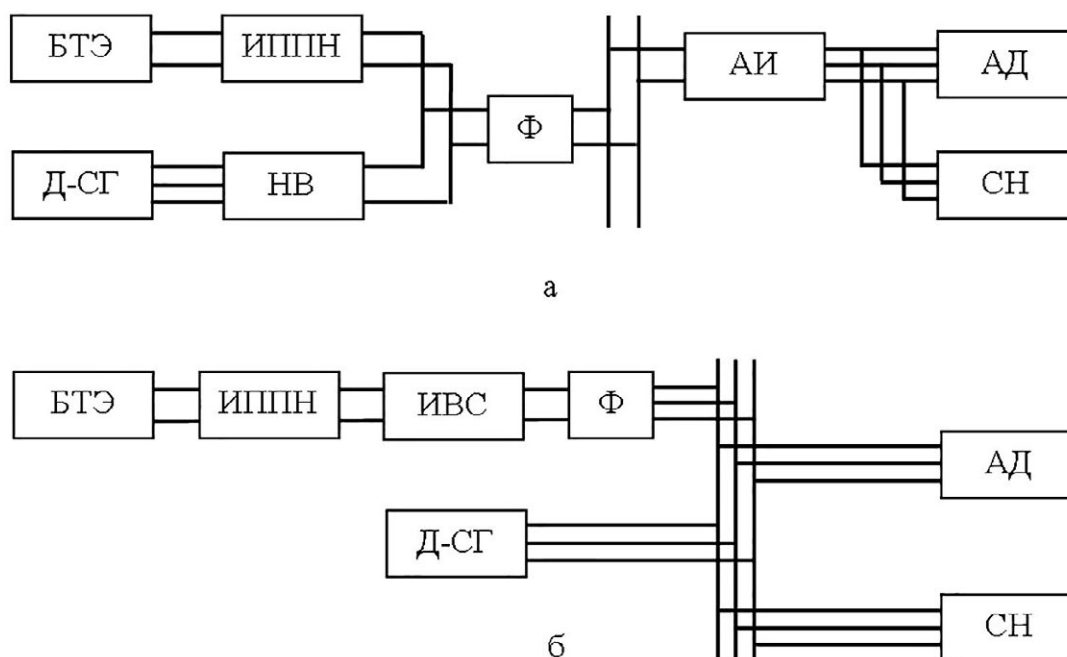


Рис. 1. Структурная схема АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и общей шиной переменного (б) тока.

БТЭ – батарея топливных элементов; **Д-СГ** — синхронный дизель-генератор; **ИППН** – импульсный преобразователь постоянного напряжения; **НВ** – неуправляемый выпрямитель; **ИВС** – инвертор, ведомый сетью; **Ф** — фильтр; **АИ** – автономный инвертор; **АД** – асинхронный двигатель; **СН** — статическая нагрузка

Fig. 1. Block diagram of an autonomous electric power system with a common DC bus (a) and a common AC bus (b).

БТЭ – fuel cells battery; **Д-СГ** – synchronous diesel generator; **ИППН** – pulsed DC voltage converter; **НВ** – uncontrolled rectifier; **ИВС** – grid-driven inverter; **Ф** – filter; **АИ** – autonomous inverter; **АД** – asynchronous motor; **СН** – static load

Для структурной схемы с общей шиной постоянного тока (рис. 1а) в составе АЭЭС необходимо иметь импульсный преобразователь постоянного напряжения, рассчитанный на номинальную мощность БТЭ (100 кВт), неуправляемый трехфазный выпрямитель, рассчитанный на номинальную мощность синхронного генератора (100 кВт) и автономный инвертор, рассчитанный на суммарную мощность потребителей (при заданных потребителях – 77 кВА) и допускающий 7,5-кратную перегрузку по току при прямом пуске асинхронного двигателя. Фильтр с учетом возможности подключения к общей шине других приемников энергии необходимо рассчитать на суммарную мощность источников энергии (200 кВт).

Для структурной схемы с общей шиной переменного тока (см. рис. 1б) в составе АЭЭС необходимо иметь импульсный преобразователь

постоянного напряжения и инвертор, ведомый сетью, рассчитанные на мощность БТЭ (100 кВт). Фильтр необходимо рассчитать на выходную мощность канала БТЭ–ИППН–ИВС (100 кВА).

Таким образом, по количеству и суммарной мощности преобразователей энергии и фильтрующих устройств, структура с общей шиной переменного тока для рассматриваемой системы является более предпочтительной.

ПЕРЕХОДНЫЕ И УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Важным элементом сравнительного анализа вариантов структуры АЭЭС является моделирование и анализ переходных и установившихся процессов в системе. Рассмотрим следующие типовые переходные режимы в АЭЭС с дизель-генератором и батареей ВТЭ: включение статической нагрузки при питании от батареи ВТЭ; прямой пуск асинхронного двигателя при включенной статической нагрузке и питании от ВТЭ; перевод питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с дизель-генератора на батарею ВТЭ. В качестве критериев сравнения примем следующие показатели: суммарные потери мощности в полупроводниковых преобразователях; качество и длительность переходных процессов; расход топлива (воздух, водород), пульсации и гармонический состав тока батареи ВТЭ; гармонический состав напряжения общей шины.

Исследование указанных типовых режимов выполнено на имитационной модели, реализованной в пакете MATLAB-Simulink.

Режим включения статической нагрузки при питании от батареи ВТЭ. Графики переходных процессов, возникающих при подключении статической нагрузки к батарее ВТЭ представлены на рис. 2. В табл. 2 представлены результаты моделирования по показателям характера и длительности переходных процессов, суммарным потерям мощности в полупроводниковых преобразователях, амплитуде пульсаций и гармоническому составу тока батареи ВТЭ, а также гармоническому составу напряжения общей шины.

Режим прямого пуска асинхронного двигателя при включенной статической нагрузке и питании от батареи ВТЭ. В рассматриваемом режиме совместно с включенной статической нагрузкой ($S = 30$ кВА, $\cos\varphi = 0,8$) к батарее ВТЭ путем прямого пуска подключается асинхронный

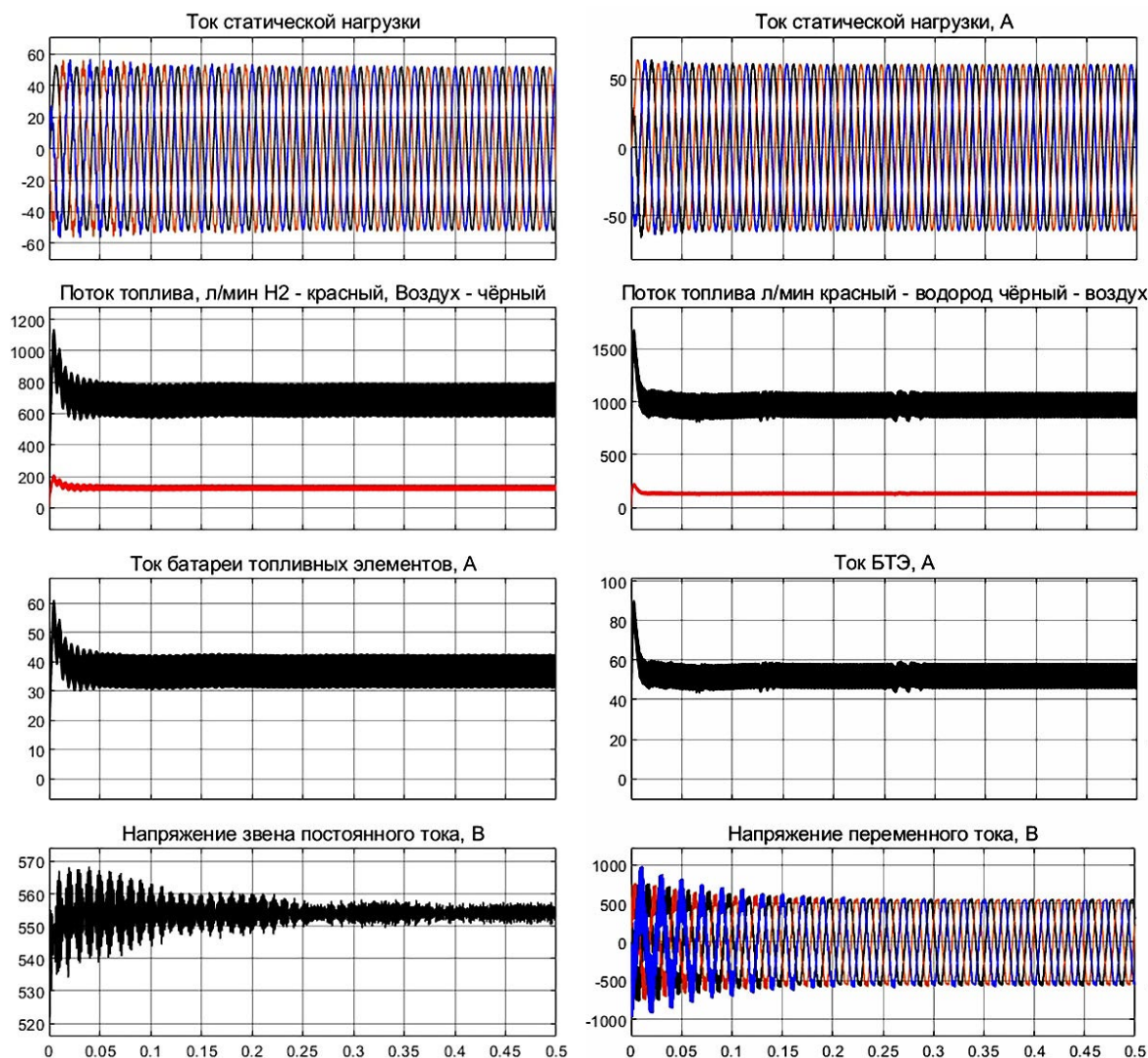


Рис. 2. Переходные процессы при подключении статической нагрузки к батарее ВТЭ в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока.

Fig. 2. Transient processes when connecting a static load to a fuel-cells battery in an autonomous electric power system with a common DC (a) and common AC (b) bus

двигатель с нагрузкой на валу в виде турбомеханизма. Нагрузка на валу асинхронного двигателя описывается зависимостью:

$$M_C = M_{C0} + K(n_M / n_{ном})^2,$$

где M_{C0} – начальный (при нулевой скорости вращения) статический момент сопротивления исполнительного механизма ($M_{C0} = 50$ Нм); K – статический момент сопротивления исполнительного механизма при вращении ($K = 200$ Нм); n_M , $n_{ном}$ – текущее и номинальные значения частоты вращения ротора асинхронного двигателя ($n_{ном} = 1467$ об/мин).

Таблица 2. Результаты моделирования режима включения статической нагрузки**Table 2.** Simulation results for static load switching mode

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,44	0,23
Длительность переходного процесса*, с	0,2	0,3
Характер переходного процесса*	Апериодический	Апериодический
Средний ток батареи ВТЭ, А	36,9	52,0
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	5	5
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,135	0,096
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	13,01	10,33
Напряжение общей шины, В**	554	566
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U)	0,38	5,40

*Примечание: здесь и далее длительность и характер переходного процесса оцениваются по изменению напряжения общей шины.

**Примечание: здесь и далее для общей шины постоянного тока дано значение постоянной составляющей, для общей шины переменного тока – действующее значение основной гармоники (50 Гц).

Графики переходных процессов, возникающих в рассматриваемых АЭЭС при прямом пуске асинхронного двигателя, представлены на рис. 3. В табл. 3 представлены результаты моделирования по ряду важных показателей.

Режим перевода питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с синхронного дизель-генератора на батарею ВТЭ. Статическая нагрузка и асинхронный двигатель включены и работают в установившемся режиме с номинальными мощностями. Питание нагрузок переводится с синхронного дизель-генератора на батарею ВТЭ в три этапа: на первом этапе нагрузки питает только дизель-генератор, на втором этапе осуществляется совместное питание нагрузок от дизель-генератора и батареи ВТЭ, на третьем этапе нагрузки получают питание только от батареи ВТЭ (дизель-генератор отключен). Графики переходных и установившихся процессов в рассматриваемом режиме представлены на рис. 4. В табл. 4 представлены результаты моделирования; показатели

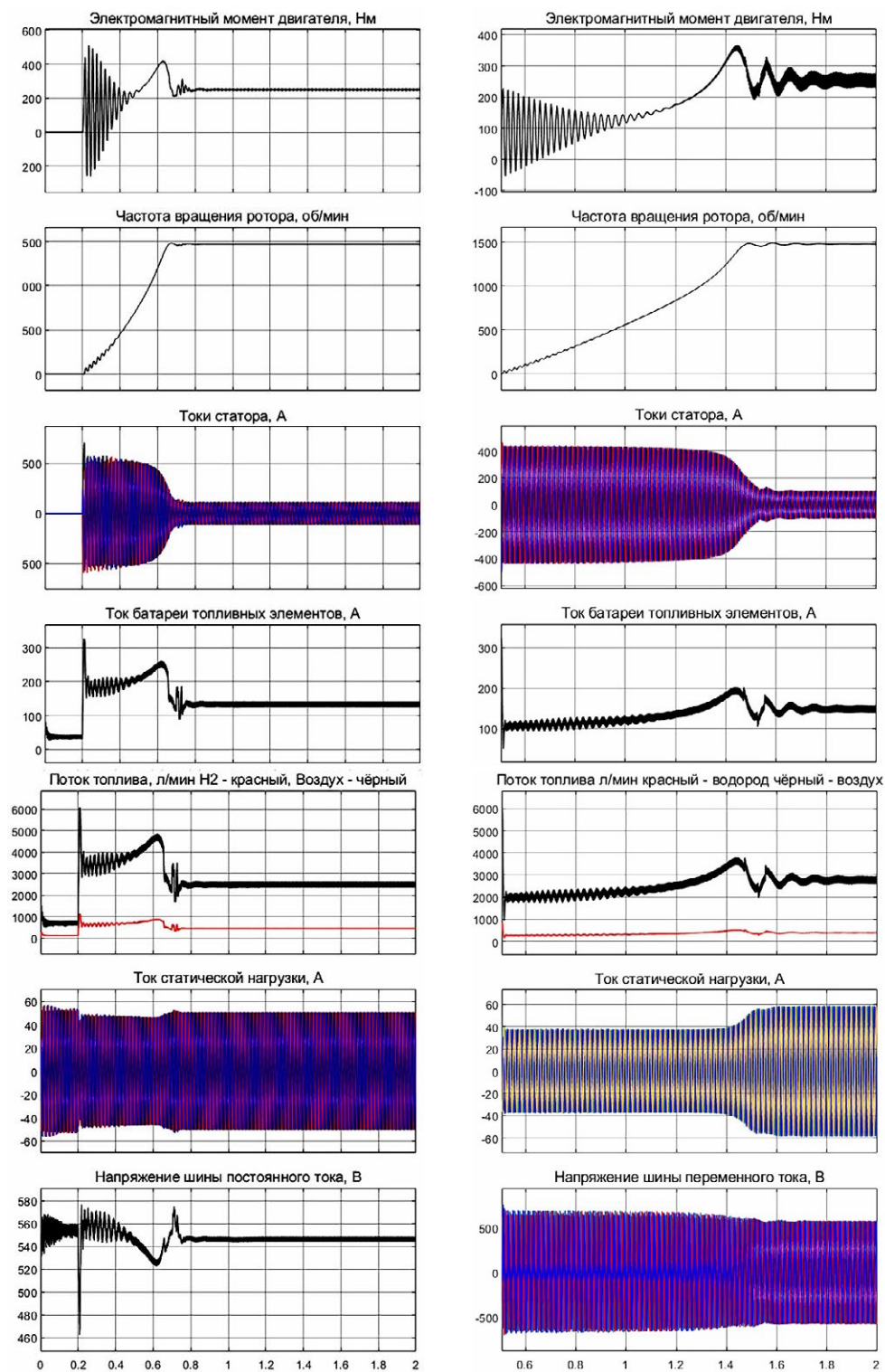


Рис. 3. Переходные процессы в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока при прямом пуске асинхронного двигателя и работающей статической нагрузке

Fig. 3. Transient processes in an autonomous electric power system with a DC common bus (a) and AC common bus (b) with direct start of an asynchronous motor and a working static load.

Таблица 3. Результаты моделирования режима прямого пуска асинхронного двигателя с нагрузкой на валу при включенной статической нагрузке**Table 3.** Results of modeling the direct start mode of an asynchronous motor with a load on the shaft and a static load turned on

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,115	0,075
Длительность переходного процесса, с	0,8	1,5
Характер переходного процесса	Апериодический	Апериодический
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	5	5
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,035	0,034
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	9,91	7,98
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U)	4,62	4,59
Провал напряжения общей шины при пуске двигателя, %	4,6	8,3

приведены для второго этапа, когда питание потребителей осуществляется при совместной работе дизель-генератора и батареи ВТЭ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование переходных и установившихся процессов в АЭЭС показало, что батарея ВТЭ характеризуется достаточно быстрым откликом на изменение нагрузки: при скачкообразных колебаниях мощности потребителей время отклика не превышает нескольких десятых долей секунды. Батарея ВТЭ характеризуется относительно стабильным КПД, который изменяется в диапазоне $\eta = 0,57...0,62$ при изменении мощности потребителей более чем в два раза. В процессе пуска и разбега асинхронного двигателя КПД батареи ВТЭ может кратковременно (на время разбега) уменьшаться до $\eta = 0,50...0,52$. Значения КПД батареи ВТЭ в установившихся режимах представлены в табл. 5.

Переменная составляющая тока батареи ВТЭ представлена высокочастотными гармониками: первая – 10 кГц. Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ мало меняется при изменении величины нагрузки. Относительное значение амплитуд гармоник переменной составляющей

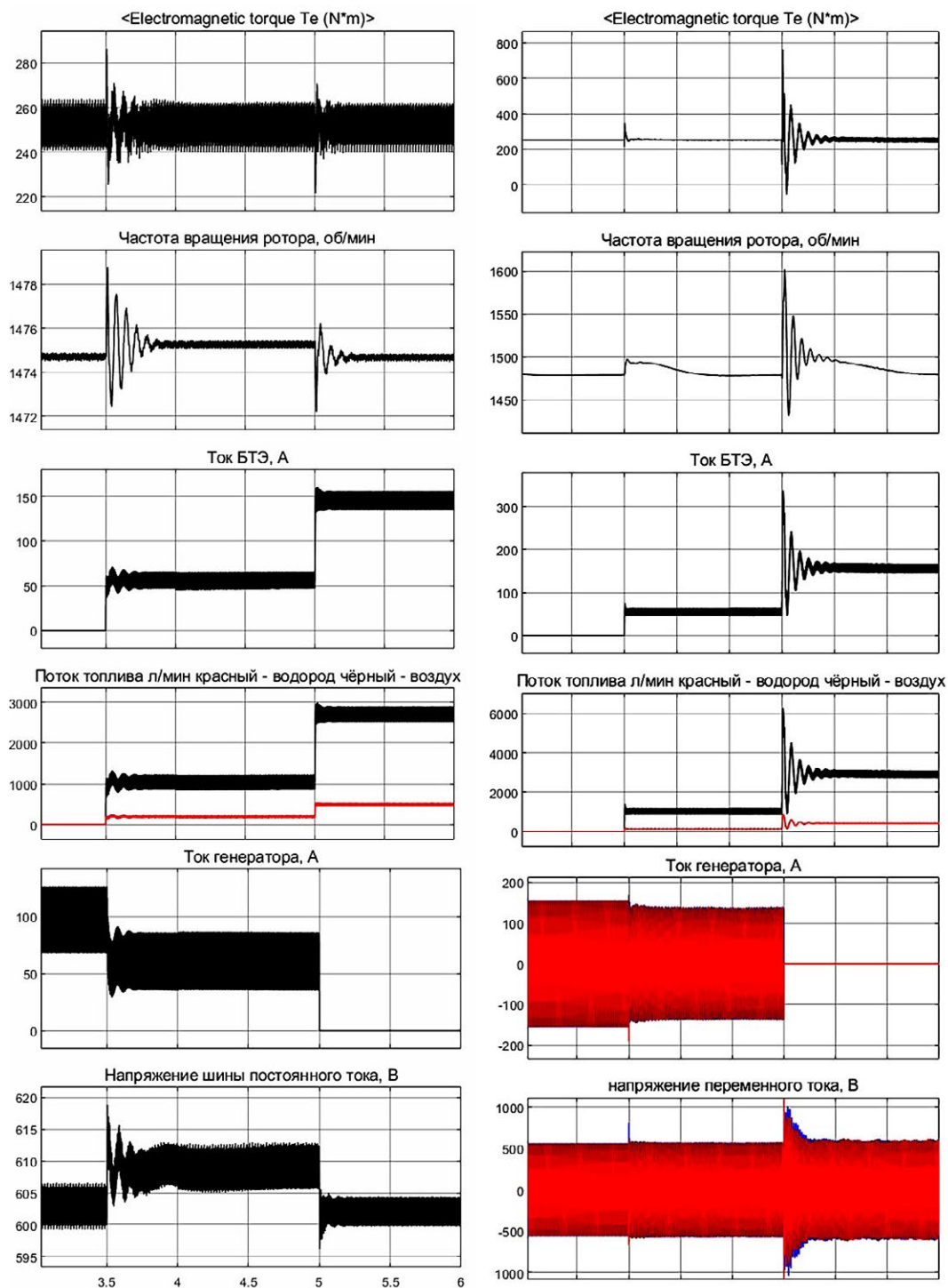


Рис. 4. Переходные процессы в АЭЭС с общей шиной постоянного (а) и переменного (б) тока при переводе питания статической нагрузки и асинхронного двигателя с дизель-генератора на батарею ВТЭ.

Fig. 4. Transient processes in an autonomous electric power system with a DC common bus (a) and AC common bus (b) when transferring power of a static load and an asynchronous motor from a diesel generator to a fuel-cells battery

Таблица 4. Результаты моделирования режима перевода питания статической нагрузки и асинхронного двигателя**Table 4.** Results of modeling the power transfer mode of a static load and an asynchronous motor

Показатель	АЭЭС с общей шиной постоянного тока	АЭЭС с общей шиной переменного тока
Суммарные потери мощности в преобразователях в установившемся режиме, кВт	0,166	0,066
Длительность переходного процесса, с	0,5	0,4
Характер переходного процесса	Колебательный	Колебательный
Средний ток батареи ВТЭ, А	56,26	55,06
Амплитуда пульсаций тока батареи ВТЭ, А	7,5	7,6
Коэффициент пульсаций тока батареи ВТЭ	0,133	0,138
Коэффициент гармоник тока батареи ВТЭ (THD_I), %	13,37	13,13
Напряжение общей шины, В*	608,8	563,4
Коэффициент гармоник напряжения общей шины (THD_U), %	0,37	4,10

тока батареи ВТЭ в процентах от постоянной составляющей тока и коэффициент гармоник для установившихся процессов рассматриваемых режимов работы АЭЭС представлены в табл. 6.

Характер переходных процессов в АЭЭС в рассмотренных режимах удовлетворительный: аperiodический или малоколебательный. Длительность переходных процессов для режимов 1 и 3 не превышает нескольких десятых долей секунды, для режима 2 (прямой пуск асинхронного двигателя) – определяется временем разбега двигателя, по окончании которого все величины стабилизируются в течение 0,5 с.

По количеству полупроводниковых преобразователей и фильтрующих устройств, а также по их суммарной расчетной мощности АЭЭС с общей шиной переменного тока является более предпочтительной для питания заданных потребителей. Наиболее рациональная структура АЭЭС должна быть установлена в каждом конкретном случае, исходя из соотношения мощностей и функционального назначения источников и потребителей энергии. Если основной (наиболее мощный) источник энергии представляет собой источник переменного тока, а вспомогательный источник (менее мощный) – источник постоянного тока, тогда предпочтение следует отдать

Таблица 5. КПД батареи ВТЭ в установившихся режимах.**Table 5.** The efficiency of a fuel-cell battery in a static modes.

Режим	ОШ постоянного тока		ОШ переменного тока	
	Мощность нагрузки ВТЭ, кВт	КПД батареи	Мощность нагрузки ВТЭ, кВт	КПД батареи
1	24	0,62	24	0,62
2	40	0,58	40	0,58
3	64	0,57	64	0,57

Таблица 6. Относительные значения амплитуд гармоник тока батареи ВТЭ (общая шина постоянного/переменного тока)**Table 6.** Relative values of harmonic amplitudes of the fuel-cell battery current (common DC/AC bus)

Режим	Порядок гармоник тока батареи ВТЭ				THDI
	1 (10 кГц)	2 (20 кГц)	3 (30 кГц)	4 (40 кГц)	
1	11,5	5,0	2,75	1,5	13,01
	9,25	4,0	2,0	1,0	10,33
2	4,24	1,67	0,70	0,21	4,62
	4,25	1,59	0,57	0,09	4,59
3	12,5	4,5	1,5	0,25	13,37
	12,25	4,5	1,75	0,1	13,13

АЭЭС с общей шиной переменного тока. Также целесообразной будет структура с общей шиной переменного тока, если основные потребители энергии являются потребителями переменного тока постоянной частоты (например, статические нагрузки и нерегулируемые асинхронные электроприводы). АЭЭС с общей шиной постоянного тока целесообразна в тех случаях, когда батарея ВТЭ является основным источником энергии, а синхронный дизель-генератор выполняет вспомогательные функции, и основными потребителями энергии являются потребители постоянного тока или потребители переменного тока регулируемой частоты (например, асинхронные электроприводы с частотным управлением).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение батарей ВТЭ в качестве вспомогательных или основных источников энергии в составе АЭЭС позволяет обеспечивать электрической

энергией потребители во всех типовых режимах работы, оптимизировать режим нагрузки дизель-генератора, сократить его вредные выбросы в атмосферу и при необходимости выводить дизель-генератор из работы, например, для профилактического осмотра или технического обслуживания.

Батарея ВТЭ как источник энергии характеризуется быстрым откликом на резкое изменение нагрузки и относительно стабильным КПД. Переходные процессы в АЭЭС при использовании БТЭ имеют удовлетворительное качество и быстро затухают. Качество электрической энергии, которой снабжаются потребители, определяется алгоритмами управления полупроводниковыми преобразователями и параметрами фильтрующих устройств в составе энергосистемы.

Оптимальный вариант структуры АЭЭС необходимо устанавливать, исходя из мощности и функционального назначения источников энергии, а также требований по энергообеспечению потребителей. Для энергообеспечения типовых потребителей переменного тока неизменной частоты более предпочтительным вариантом структуры АЭЭС является структура с общей шиной переменного тока, т.к. она требует меньшего количества и меньшей суммарной расчетной мощности полупроводниковых преобразователей энергии.

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. Шнипова А.А. Развитие водородной энергетики в России: новая энергополитика // Энергия единой сети. 2022. № 1 (62). С. 58–69. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48211448_94382913.pdf EDN: GTVKAB
2. Tezuka K. 20 Years of Railway Technical Research Institute // Japan Railway & Transport Review. 2007. Vol. 47. N. 3. P. 9–15. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr47/pdf/f09_Tez.pdf
3. The Fuel Cell Industry Review. ERM International Group Limited, 2021. [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://fuelcellindustryreview.com>

4. Klebsch W., Guckes N., Heininger P. Evaluation of climate-neutral alternatives to diesel multiple units. Economic viability assessment based on the example of the Düren network. 2020. [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://www.vde.com/resource/blob/2068330/>
5. Ogawa K., Yoneyama T., Sudo T., et al. Performance Improvement of Fuel Cell Hybrid Powered Test Railway Vehicle // Quarterly Report of RTRI. 2021. Vol. 62. N. 1. P. 16–21. doi: 10.2219/rtrirp.62.1_16
6. Касаткин М.А., Ландграф И.К. Перспективы водородных энергоустановок на топливных элементах для развития электротранспорта // Транспорт Российской Федерации. 2019. №6 (85). С. 46–49. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42194760_27245461.pdf EDN: TBTUPX
7. Карасев Д. Водородная и аккумуляторная тяга: проекты ТМХ [internet] Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://tmholding.ru/media/article/7135.html>
8. Дугин Г.С., Григорьев С.А. Новые возможности использования топливных элементов на транспортных средствах // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 2 (14). С. 76–78. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://ngvrus.ru/file/journal-history/tat-2-2010-preview.pdf> EDN: MBWLIZ
9. Study of Hydrogen Fuel Cell Technology for Rail Propulsion and Review of Relevant Industry Standards. № DOT/FRA/ORD-21/20. Washington: Federal Railroad Administration, 2021. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-06/Study%20of%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Tech.pdf>
10. Лапидус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 2019. № 5. С. 274–283. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283
11. Ким К.К., Ткачук А.А. Трехфазный трансформатор со стабилизирующими свойствами // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 18–21. Дата обращения: 13.12.2023. Режим доступа: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/336/6jlcafwyohyzloe8qniupvrhzuwsa2z9.pdf>
12. Asabin V., Garanin M., Kurmanova L., et al. Prospects for using hydrogen on railway transport // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 953. P. 012074. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012074
13. Байко А.В., Никитин В.В., Середа Е.Г. Водородные источники электроэнергии с инверторами тока в судовых электростанциях переменного тока // Электротехника. 2017. № 6. С. 36–42. doi: 10.3103/S1068371217060037
14. Nikitin V.V., Marikin A.N., Tret'yakov A.V. Generator cars with hybrid power plants // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87. N. 5. P. 260–265. doi: 10.3103/S1068371216050138
15. Kim K.K., Panychev A.Yu., Blazhko L.S. Innovative Energy Sources for Hyperloop High-Speed Transport // BRICS Transport. 2022. Vol. 1. N. 1. P. 1–10. doi: 10.46684/2022.1.1

REFERENCES

1. Shnipova AI. Development of hydrogen energy in Russia: a new energy policy. *Energy of Unified Grid*. 2022;62(1):58–69. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://энергия-единой-сети.рф/annotatsii-nomerov/1-62-2022/>
2. Tezuka K. 20 Years of Railway Technical Research Institute. *Japan Railway & Transport Review*. 2007;47(3):9–15. [cited: 13.12.2023] Available from: https://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr47/pdf/f09_Tez.pdf
3. The Fuel Cell Industry Review, 2021. [internet] [cited 13 Dec. 2023] Available from: <https://fuelcellindustryreview.com>
4. Klebsch W, Guckes N, Heininger P. Evaluation of climate-neutral alternatives to diesel multiple units. Economic viability assessment based on the example of the Düren network. June, 2020. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://www.vde.com/resource/blob/2068330/>
5. Ogawa K, Yoneyama T, Sudo T, et al. Performance Improvement of Fuel Cell Hybrid Powered Test Railway Vehicle. *Quarterly Report of RTRI*. 2021;62(1):16–21. doi: 10.2219/rtriqr.62.1_16
6. Kasatkin MA, Landgraf IK. Perspektivy vodorodnyh energoustanovok na toplivnyh elementah dlya razvitiya elektrotransporta. *Transport of Russian Federation*. 2019;6(85):46–49 (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42194760_27245461.pdf EDN: TBTUPX
7. Karasev D. Vodorodnaya i akkumulyatornaya tyaga: proekty TMH. (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: <https://tmholding.ru/media/article/7135.html>
8. Dugin GS, Grigoriev SA. New possibilities for fuel cells application on the transport means. *Alternative Fuel Transport*. 2010;2(14):76–78. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://ngvrus.ru/file/journal-history/tat-2-2010-preview.pdf> EDN: MBWLIZ
9. Study of Hydrogen Fuel Cell Technology for Rail Propulsion and Review of Relevant Industry Standards. № DOT/FRA/ORD-21/20. Washington: Federal Railroad Administration, 2021. [cited: 13.12.2023] Available from: <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-06/Study%20of%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Tech.pdf>
10. Lapidus BM. Improvements in energy efficiency and the potential use of hydrogen fuel cells in railway transport. *The Russian Railway Science Journal*. 2019;5: 274–283. (In Russ.) doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-5-274-283
11. Kim KK, Tkachuk AA. The three-phase transformer with stabilizing properties. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2016;5:18–21. (In Russ.) [cited: 13.12.2023] Available from: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/336/6jlcafwyohyzloe8qniupvrhzuwsa2z9.pdf>
12. Asabin V, Garanin M, Kurmanova L, et al. Prospects for using hydrogen on railway transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;953:012074. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012074
13. Baiko AV, Nikitin VV, Sereda EG. Hydrogen energy sources with current inverters in ship AC power plants. *Russian Electrical Engineering*. 2017;6(88):355–360. doi: 10.3103/S1068371217060037

14. Nikitin VV, Marikin AN, Tret'yakov AV. Generator cars with hybrid power plants. *Russian Electrical Engineering*. 2016;5(87):260–265. doi: 10.3103/S1068371216050138
15. Kim KK, Panychev AY, Blazhko LS. Innovative Energy Sources for Hyperloop High-Speed Transport. *BRICS Transport*. 2022;1(1):1–10. doi: 10.46684/2022.1.1

Сведения об авторах:

Карабаджак Иван Дмитриевич, инженер, аспирант;

eLibrary SPIN: 4353-5098;

E-mail: iwan.karabajack@yandex.ru

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;

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

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Information about the authors:

Ivan D. Karabadzhak, engineer, post-graduate student;

eLibrary SPIN: 4353-5098

E-mail: iwan.karabajack@yandex.ru

Victor V. Nikitin, Dr. Sci (Tech.), Associate Professor;

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

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 538.955

<https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

© И.В. Мартиросян, Д.А. Александров,

С.В. Покровский, И.А. Руднев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(Москва, Россия)

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПРИ НАРУШЕНИИ СООСНОСТИ РОТОРА И СТАТОРА

Цель. Анализ влияния гармонических возбуждений при несоосности подшипника на силовые и механические характеристики высокооборотного магнитного подшипника на основе ленточных высокотемпературных сверхпроводящих композитов.

Методы. Численный мультифизический анализ сверхпроводящего радиально-упорного магнитного подшипника выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты. При отклонении от соосности в расположении магнитных элементов ВТСП подшипника проявляются гармонические возбуждения, вибрации и биения, приводящие к ухудшению нагрузочных характеристик устройства и снижению динамической проницаемости магнитной системы.

Заключение. Разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические и механические характеристики высокооборотных ВТСП подшипников может быть применена для разработки высокоскоростных роторных систем.

Ключевые слова: ВТСП композиты; высокооборотный ВТСП подшипник; транспортные системы; метод конечных элементов.

Как цитировать:

Мартиросян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В., Руднев И.А. Динамические характеристики магнитного подшипника на основе высокотемпературных сверхпроводников при нарушении соосности ротора и статора // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 76–92.

<https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian, D.A. Alexandrov, S.V. Pokrovskii, I.A. Rudnev

National research nuclear university MEPhI

(Moscow, Russia)

**DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MAGNETIC BEARING
BASED ON HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS
IN THE EVENT OF ROTOR AND STATOR MISALIGNMENT**

Aim: This study aims to analyze the influence of harmonic excitations during bearing misalignment on the power and mechanical characteristics of a high-speed magnetic bearing based on tape high-temperature superconducting composites.

Methods. Numerical multiphysics analysis of a superconducting magnetic bearing was performed using the finite element method in Comsol Multiphysics.

Results. When there is a deviation from coaxiality in the arrangement of the magnetic elements of the HTS bearing, harmonic excitations, vibrations, and beats appear, leading to a deterioration in the load characteristics of the device and a decrease in the dynamic permeability of the magnetic system.

Conclusion. The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic and mechanical characteristics of high-speed HTS bearings and can be used to develop high-speed rotor systems.

Keywords: HTS composites, high-speed HTS bearings, transport systems, finite element method.

To cite this article:

Martirosian IV, Alexandrov DA, Pokrovskii SV, Rudnev AI. Dynamic characteristics of a magnetic bearing based on high temperature superconductors in the event of rotor and stator misalignment. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):76–92. <https://doi.org/10.17816/transsyst625010>

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью огромного числа современных вращающихся машин является магнитный подшипник. Перед традиционными механическими подшипниками магнитные подшипники обладают рядом преимуществ, такими как высокий срок эксплуатации, высокий уровень демпфирования механических возбуждений, минимальные затраты на техническое обслуживание [1, 2]. В настоящее время магнитные подшипники на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) всё чаще находят применение в областях аэрокосмической промышленности, транспорта, экологически чистого производства и хранения электроэнергии. Такие ВТСП подшипники не требуют сложного активного управления и способны работать в сложных условиях, таких как вакуум, высокие скорости вращения, экстремальные температурные диапазоны, агрессивные химические среды и т.д. [3–5]. Первый в мире пассажирский поезд на магнитной подушке был разработан на основе ВТСП подшипников в 2002 году [6]. В дальнейшем в Китае, Германии и Бразилии были проведены испытания магнито-левитационного транспорта при транспортировке по вакуумным трубам и построены первые испытательные линии маглева [7–9]. В последние десятилетия интерес к вопросам разработки и оптимизации магнитных ВТСП подшипников продолжает неуклонно расти. В связи с этим, исследования динамических характеристик ВТСП подшипников, напрямую связанные с обеспечением их устойчивости и надежности при длительной работе, привлекают всё больше внимания [10–13].

Преимущественная часть магнитных ВТСП подшипников состоит из двух основных блоков: ВТСП элементов и сборок постоянных магнитов (ПМ) [14]. В более ранних исследованиях в качестве ВТСП элементов в основном применялись объемные сверхпроводники. Однако, в настоящее время для создания ВТСП подшипников всё чаще применяют различные наборы ленточных ВТСП композитов [15, 16]. Композитные ВТСП ленты имеют слоистую структуру, содержащую прочную металлическую подложку, слой сверхпроводника, а также слои меди и серебра с хорошей теплопроводностью [17]. Такие проводники могут быть сложены в стопки лент и обладают хорошими механическими свойствами, имеют высокую термическую стабильность, при этом магнито-силовые характеристики композитных лент сопоставимы с объемными ВТСП, а в ряде случаев превосходят их [18–21].

В настоящей работе приводятся результаты моделирования динамических характеристик ВТСП подшипника на основе ленточных ВТСП композитов. Рассматриваются два случая: система с идеальным центрированием подшипника, а также система со смещенным ротором. Численный анализ магнито-силовых, механических и динамических характеристик выполняется с использованием метода конечных элементов.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Общий вид моделируемой системы представлен на рис. 1. На стальном валу диаметра 40 мм (см. рис. 1А) закреплены два идентичных ВТСП подшипника так, что расстояние между центрами подшипников составляет 30 см. Общая длина вала составляет 40 см. Каждый ВТСП подшипник представляет собой три незамкнутые ВТСП обмотки, расположенные на валу и три сборки постоянных магнитов, расположенные напротив ВТСП обмоток.

Рассмотрим подробнее конструкцию подшипника (см. рис. 1Б). В основе статора лежат три обмотки по 10 слоев в каждой из промышленной ВТСП-ленты ширины 12 мм. В качестве прототипов моделируемых лент выступали промышленные ВТСП ленты производства фирмы SuperOx [22]. Критический ток сверхпроводника в собственном поле при температуре кипения жидкого азота составляет 500 А. Критическая температура – 92 К. Наиболее важные характеристики композита, использующиеся при проведении численного анализа, представлены в табл. 1. Подробная спецификация характеристик ВТСП лент представлена на сайте производителя.

Ротор собран из постоянных NdFeB магнитов марки N42, расположенных вокруг сверхпроводника. В каждом из 3 колец находится по 16 постоянных магнитов. Остаточная индукция магнитного поля на поверхности каждого магнита составляет $\sim 0,25$ Тл. Вес каждого магнита составляет 7,5 г. В каждом кольце магнитное поле ПМ ориентировано одинаково по отношению к центральной оси ротора. Магнитные поля соседних колец ПМ – встречно-ориентированы.

Охлаждение ВТСП элементов до температуры 77 К в рамках модели осуществляется посредством теплопроводности твердого тела от массивного стального вала, имитируя таким образом режим криокулерного охлаждения сверхпроводника. Система находится в вакууме. Предполагается, что в начальный момент времени температура в системе превышает критическую температуру ВТСП лент, и после центрирования

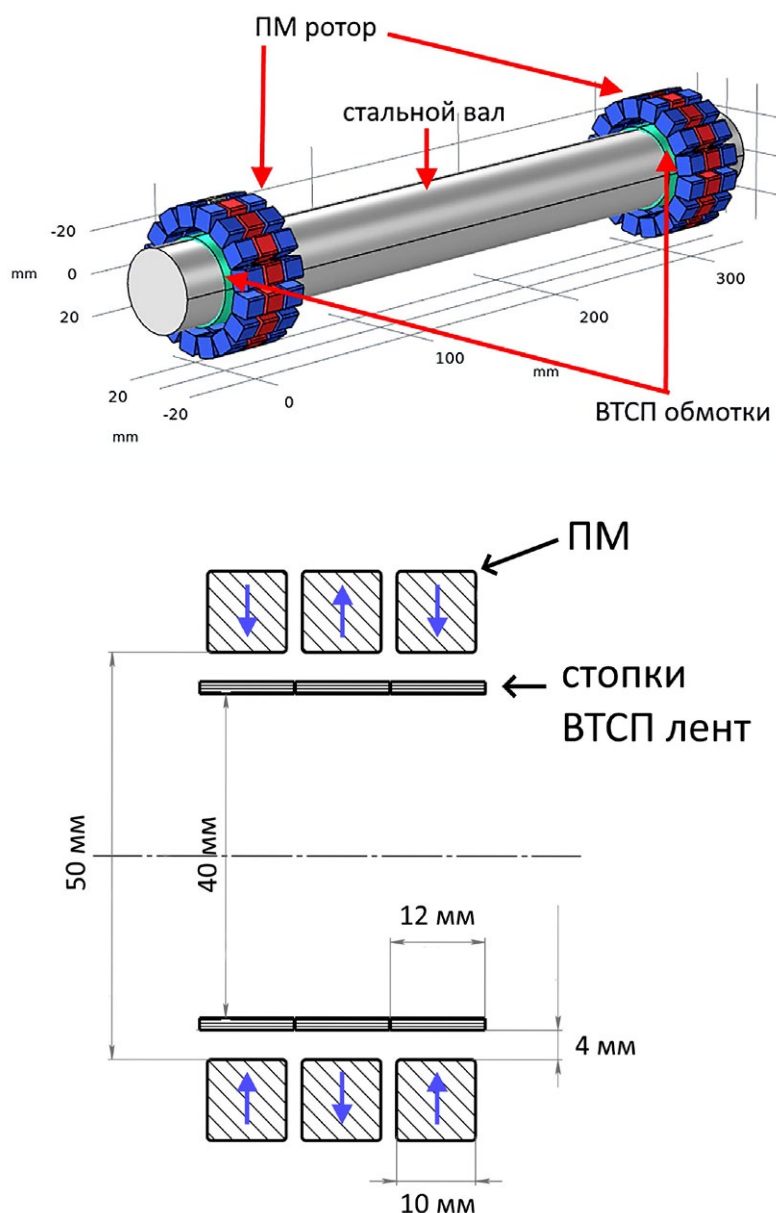


Рис. 1. Геометрия моделируемой системы:

А – общая конфигурация расчетной системы; **Б** – схема магнитной системы одного подшипника

Fig. 1. Geometry of the simulated system:

А – general configuration of the settlement system; **Б** – diagram of the magnetic system of one bearing

роторов система охлаждается. Таким образом осуществляется режим намагничивания при охлаждении в присутствии внешнего магнитного поля (FC – field cooling).

В рамках представленной работы рассматриваются динамические характеристики системы для двух случаев: в первом случае оба ротора

подшипника соосны и правильно центрированы относительно вала, во втором случае – один из роторов смещен относительно центральной оси на 1 мм. Результаты для двух случаев сравниваются для того, чтобы исследовать влияние несоосности в системе на ее динамические характеристики.

Таблица 1. Характеристики ВТСП лент

Table 1. Characteristics of HTSC tapes

Параметр	SuperOx
Толщина сверхпроводящего слоя REBCO (где RE-редкоземельный элемент)	1–3 мкм
Подложка	Hastelloy C276 50 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм
Толщина двустороннего медного покрытия	20 мкм (с каждой стороны)
Средний критический ток для ленты шириной 12 мм, А	500
Показатель степени ВАХ (используется при расчетах)	~27

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Появление композитных ВТСП лент способствовало активному развитию средне и крупномасштабных сверхпроводниковых систем. Математические модели, пригодные для оценки тепловых и электромагнитных полей в сверхпроводниках, из простых аналитических превратились в сложные вычислительные модели. Конечно-элементное моделирование сложных магнито-левитационных систем с использованием Н-формулировки уравнений Максвелла [23, 24] хотя и является одним из самых перспективных и точных методов расчета таких систем, но его использование требует больших затрат вычислительных ресурсов и времени. Используемый на данном этапе Т-А формализм является одним из самых новых сеточных методов, основная идея которого заключается в использовании формулировок токового векторного потенциала (ТВП) для сверхпроводящей области, и магнитного векторного потенциала (МВП) для непроводящих областей.

Управляющее уравнение А-Т формулировки:

$$\nabla \times \rho \nabla \times T = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial (\mu_0 \vec{H})}{\partial t}, \quad (1)$$

где ρ – сопротивление, $\mathbf{B}$ – индукция магнитного поля, t – время, μ_0 – магнитная постоянная. В качестве зависимой переменной T выступает токовый векторный потенциал (ТВП):

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \bullet T, \quad (2)$$

T – величина токового потенциала, $\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$ – вектор нормали.

Распределение токов в сверхпроводящей области определяется как:

$$\vec{J} = \nabla \times \vec{T}. \quad (3)$$

В остальных областях решается задача для магнитного векторного потенциала. Управляющее уравнение А-формализма выглядит следующим образом:

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

где μ – магнитная проницаемость.

Вольтамперная характеристика $E = \rho \bullet J$ задается в виде степенного закона для сопротивления ВТСП слоя

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1}, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля, ρ – сопротивление, E_c – критерий, равный 1 мкВ/см, J_c – плотность критического тока, n – показатель степени ВАХ. Величина критического тока, так же, как и величина показателя степени n , являются одними из основных характеристик ВТСП материала и были представлены в табл. 1.

Стоит отметить, что основное преимущество А-Т формулировки заключается в аппроксимации тонких слоев сверхпроводника двумерными, что позволяет с учетом поправочного коэффициента на тепловые потери в объеме существенно сократить расчетное время без потери в точности.

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

$$dC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-kT) = Q + dC_p u \nabla T, \quad (5)$$

где d – плотность; C_p – теплоемкость; T – температура; k – теплопроводность; Q – все источники тепла, включая термоэлектрические; u – поле скоростей температур.

Плотности, теплоемкости и теплопроводности всех слоев ленты заложены в виде интерполяции экспериментальных данных [25]. Локальное тепловыделение в системе $Q = E \cdot J$ связывает электродинамическую и теплофизическую задачи. Зависимость критического тока лент от температуры задается выражением:

$$J_c = \alpha \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^{1,5}, \quad (6)$$

где T_c – критическая температура, равная 92 К; α – фитирующий параметр.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены расчетные нагрузочные кривые при горизонтальном смещении роторов (смещение вдоль центральной оси) для полностью соосной системы и для системы с радиальным смещением одного из роторов на 1 мм. Хорошо видно, что при малых горизонтальных смещениях сила магнито-левитационного взаимодействия для случая асимметричного положения одного из подшипников немного превышает силу левитации для центрированной системы. Это обусловлено более высокой силой сцепки для отдельных ПМ, наиболее приближенных к ВТСП обмоткам. При равномерном давлении на ротор в условиях неравномерного распределения магнитных сил, при малых смещениях положение несоосного ротора становится перекошенным, и некоторое время для смещения роторов приходится прикладывать большее усилие. После этого ход нагрузочных кривых практически не отличается для двух рассмотренных случаев вплоть до смещений величины ~ 8 мм. Однако, для случая соосной системы максимальная сила взаимодействия составляет 130,4 Н при смещении на 9,2 мм, а для несимметричной системы – 117,4 Н при смещении на 8,7 мм, что говорит о меньшей осевой устойчивости

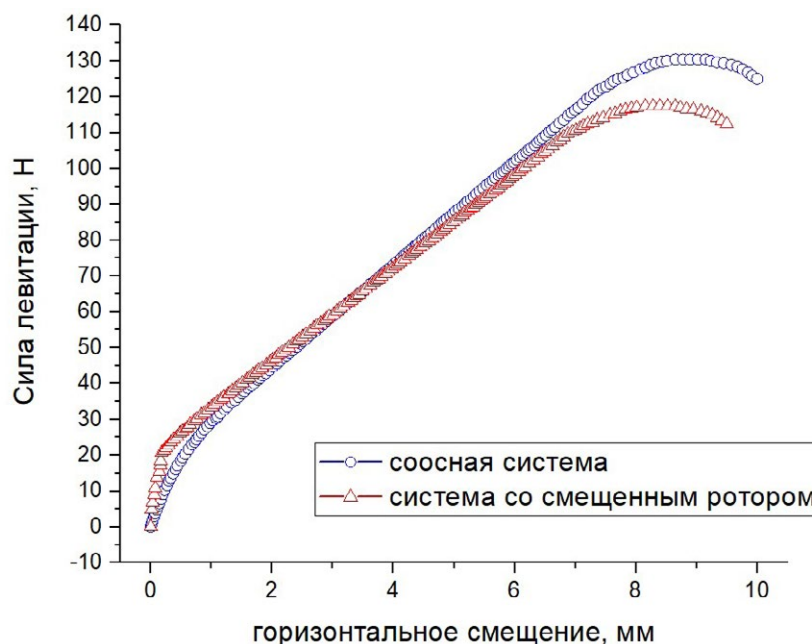


Рис. 2. Нагрузочные характеристики системы ВТСП подшипников при горизонтальном смещении: зависимости силы левитации от величины смещения роторов вдоль центральной оси системы

Fig. 2. Load characteristics of the HTSC bearing system with horizontal displacement: dependence of the levitation force on the magnitude of the rotor displacement along the central axis of the system

несимметричной системы и снижении упорной функции подшипников при отклонении от соосности.

При радиальных смещениях ситуация несколько отличается. В силу того, что один из роторов смещен в радиальном направлении, то радиальное смещение сперва затрагивает лишь один из двух роторов, и сила левитации при смещениях до 1 мм определяется лишь одним ротором (см. рис. 3). При своих максимальных смещениях обе системы характеризуются приблизительно одинаковыми значениями левитационной силы. Однако, для несоосной системы нагрузочная кривая имеет скачок характеристики, что, вероятно, скажется на динамических и механических свойствах системы при высокооборотном вращении.

Действительно, в то время как симметричные ВТСП подшипники обладают равномерной скоростью вращения, система со смещенным ротором испытывает вибрации и биения (см. рис. 4).

Примечательным является тот факт, что скорость вращения в течение первого цикла прокручивания подшипника снижается и растет на ~ 40 % от своего равновесного значения. Во время второго оборота максимальное

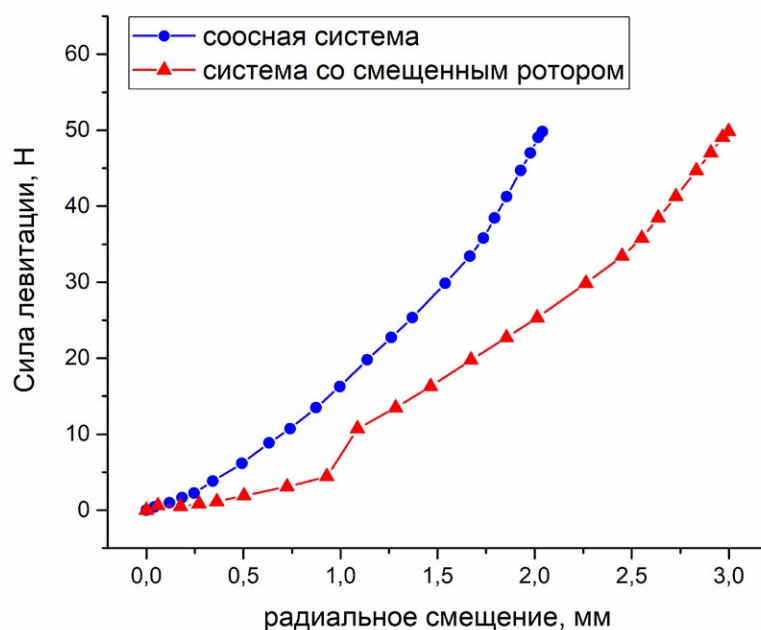


Рис. 3. Нагрузочные характеристики системы ВТСП подшипников при радиальном смещении: зависимости силы левитации от величины смещения роторов перпендикулярно центральной оси системы

Fig. 3. Load characteristics of the HTSC bearing system with radial displacement: dependence of the levitation force on the magnitude of the rotor displacement perpendicular to the central axis of the system

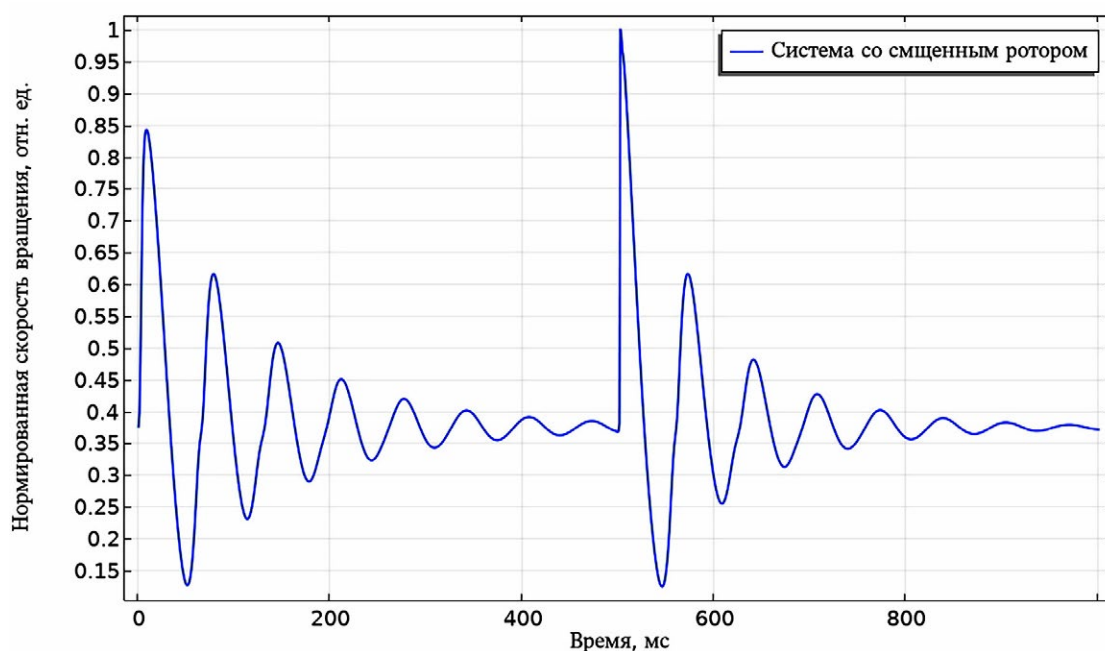


Рис. 4. Зависимость скорости вращения несимметричного ротора от времени для двух полных оборота подшипника

Fig. 4. Dependence of rotation speed of an asymmetrical rotor from time for two full revolutions of the bearing

снижение скорости составляет $\sim 42\%$, а максимальный прирост $\sim 65\%$. Таким образом, наблюдается «раскачка» подшипника при несоосном вращении.

На основе разработанных численных моделей был рассчитан коэффициент динамической проницаемости системы при различных скоростях вращения подшипника. Результаты расчетов представлены на рис. 5 для центрированной системы и систем с различными смещениями одного из роторов. Хорошо видно, что центрированная система выдерживает нагрузки до 2000 оборотов в секунду без существенного снижения динамической проницаемости и лишь при частотах вращения $\sim 20\,000$ Гц проницаемость системы обращается в ноль. Чем сильнее отклонение от соосности, тем раньше начинает снижаться коэффициент динамической проницаемости. Возникновение дополнительных вибраций и биений приводит к нарушению ее стабильности и устойчивости. Так, для системы со смещенным ротором на 1 мм нестабильность работы начинает проявляться уже при частотах вращения порядка 100 об./сек. Для системы со смещенным ротором на 0,5 мм система находится в устойчивом состоянии до частот порядка 300 об./сек.

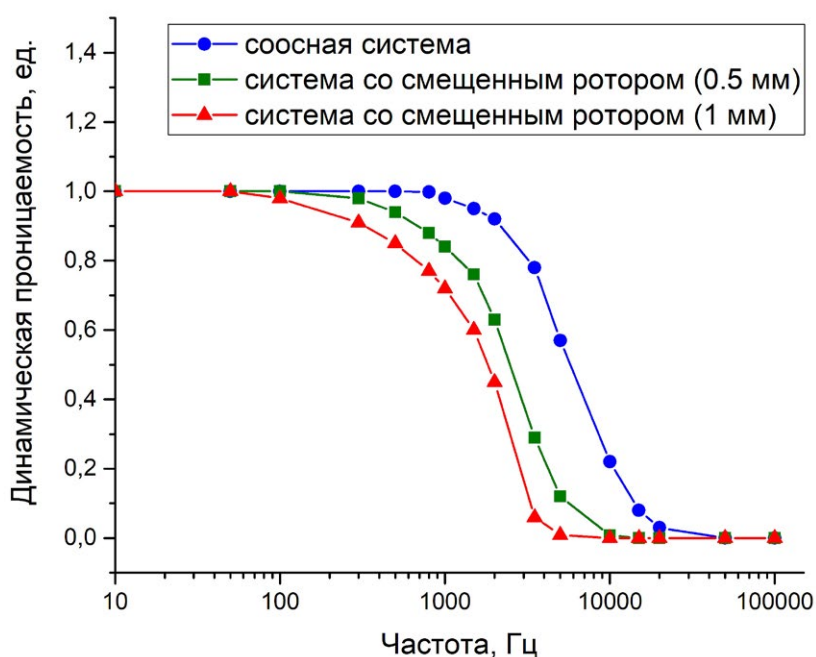


Рис. 5. Зависимости коэффициента динамической проницаемости системы от частоты вращения подшипников

Fig. 5. Dependencies of the coefficient of dynamic permeability of the system on bearing rotation speed

Таким образом, с использованием методов численного анализа показаны возможности прогнозирования динамических и магнито-силовых характеристик высокооборотных радиально-упорных подшипников на основе ВТСП композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода конечных элементов разработана комплексная мультифизическая модель радиально-упорного магнитного подшипника на основе ленточных ВТСП композитов. Модель на основе А-Т формализма позволяет за сравнительно короткое время выполнять совместный электродинамический и тепловой расчет параметров магнитной системы при движении ВТСП элементов в градиентном магнитном поле.

Система, состоящая из двух вращающихся подшипников исследована на предмет влияния отклонения одного из подшипников от соосного симметричного положения. Показано, что при радиальном отклонении одного из роторов на 1 мм наблюдается снижение левитационной силы при смещении роторов вдоль центральной оси на 17 %. При этом максимальная радиальная сила магнито-левитационного взаимодействия остается неизменной, но нагрузочная характеристика при радиальных смещениях испытывает скачок, что приводит к возникновению биений и вибраций в процессе работы подшипника. Динамическая проницаемость системы исследована при различных скоростях вращения как для центрированной системы, так и для систем с различным отклонением ротора. Показано, что соосная система способна сохранять свои динамические свойства при работе на частоте до 2000 Гц, при этом полная потеря динамической стабильности наблюдается лишь при скоростях вращения $\sim 20\,000$ об./сек. Системы с радиальным отклонением ротора демонстрируют на порядок худшие динамические характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 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. Sun X.D., Chen L., Yang Z.B. Overview of bearingless permanent-magnet synchronous motors // IEEE T Ind Electron. 2013. Vol. 60. P. 5528–5538. doi: 10.1109/tie.2012.2232253
2. Samanta P., Hirani H. Magnetic bearing configurations: theoretical and experimental studies // IEEE Trans Magn. 2008. Vol. 44. P. 292–300. doi: 10.1109/tmag.2007.912854
3. Andriollo M., Fanton E., Tortella A. A review of innovative electromagnetic technologies for a totally artificial heart // Appl Sci. 2023. Vol. 13. P. 1870. doi:10.3390/app13031870
4. Rogers J.G., Pagani F.D., Tatoes A.J., et.al. Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure // N Engl J Med. 2017. Vol. 376. P. 451–460. doi: 10.1056/NEJMoa1602954
5. Li X.J., Palazzolo A., Wang Z.Y. A combination 5-DOF active magnetic bearing for energy storage flywheels // IEEE Trans Transp Electrification. 2021. Vol. 7. P. 2344–2355. doi: 10.1109/tte.2021.3079402
6. Wang J.S., Zeng Y., Huang H., et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world // Physica C. 2002. Vol. 378–381. N. 1. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Deng Z., Zhang W., Zheng J., et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. Vol. 27. N. 6. P. 3602008. doi: 10.1109/TASC.2017.2716842
8. Kuhn L., de Haas O., Berger D. Supratrans II–Test drive facility for a superconductor based maglev train. Elekt. Bahnen. 2012. Vol. 8. P. 461–469. doi: 10.1109/TASC.2005.849636
9. Sotelo G.G., Oliveira R.A.H., Costa F.S., et.al. A full scale superconducting magnetic levitation vehicle operational line // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. Vol. 23. N. 3. P. 3601005. doi: 10.1109/TASC.2014.2371432
10. Hikihara T., Moon F.C. Chaotic levitated motion of a magnet supported by superconductor // Phys. Lett. A. 1994. Vol. 191. N. 3/4. P. 279–284. doi: 10.1016/0375-9601(94)90140-6
11. Hikihara T., Fujinami T., Moon F.C. Bifurcation and multifractal vibration in dynamics of a high-Tc superconducting levitation system // Phys. Lett. A. 1997. Vol. 231. N. 3/4. P. 217–223. doi: 10.1016/S0375-9601(97)00305-8
12. Coombs T.A., Campbell A.M. Gap decay in superconducting magnetic bearings under the influence of vibrations // Physica C. 1996. Vol. 256. N. 3. P. 298–302. doi: 10.1016/0921-4534(95)00670-2

13. Hull R. Superconducting bearings // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. Vol. 13. N. 2. P. R1-R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
14. Wang J., Wang S., Zeng Y., et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world // *Physica C*. 2002. Vol. 378–381. P. 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
15. Jha A.K., Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy // *Frontiers in Physics, Review*. 2019. Vol. 7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082
16. Barth C., Mondonico G., Senatore C. Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T // *Supercond. Sci. Technol.* 2015. Vol. 28. N. 4. P. 045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
17. MacManus-Driscoll J.L., Wimbush S.C. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors // *Nature Reviews Materials*. 2021. Vol. 6. N. 7. P. 587–604. doi:10.1038/s41578-021-00290-3
18. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., et al. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. Vol. 27. P. 044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
19. Tomków Ł., Mineev N., Smara A., et al. Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20 K // *Cryogenics*. 2020. Vol. 105. P. 103017. doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017
20. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. In: *High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy*. 2012. P. 34–68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
21. Patel A., Baskys A., Mitchell-Williams T., et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape // *Supercond. Sci. Technol.* 2018. Vol. 31. N. 9. P. 09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
22. SuperOx [Internet]. [cited 2023 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
23. Мартиросян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А. и др. Моделирование динамических характеристик магнитолевитационной транспортной платформы в процессе движения, разгона и торможения // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2022. Т. 8. № 3. С. 63–77. EDN: FRVRIA doi: 10.17816/transsyst20228363-77
24. Osipov M., Anishenko I., Starikovskii A., et al. Scalable Superconductive Magnetic Bearing Based on Non-Closed CC Tapes Windings // *Supercond. Sci. Technol.* 2021. P. SUST-104182.R1. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
25. Anischenko I.V., Osipov M.A., Pokrovskii S.V., et al. Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 4. N. 12. P. 1982–1990. doi: 10.1134/S1063778821100045

REFERENCES

1. Sun XD, Chen L, Yang ZB. Overview of bearingless permanent-magnet synchronous motors. *IEEE T Ind Electron*. 2013;60:5528–5538. doi: 10.1109/tie.2012.2232253
2. Samanta P, Hirani H. Magnetic bearing configurations: theoretical and experimental studies. *IEEE Trans Magn*. 2008;44:292–300. doi: 10.1109/tmag.2007.912854
3. Andriollo M, Fanton E, Tortella A. A review of innovative electromagnetic technologies for a totally artificial heart. *Appl Sci*. 2023;13:1870. doi:10.3390/app13031870
4. Rogers JG, Pagani FD, Tatrooles AJ, et.al. Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure. *N Engl J Med*. 2017;376:451–460. doi: 10.1056/NEJMoa1602954
5. Li XJ, Palazzolo A, Wang ZY. A combination 5-DOF active magnetic bearing for energy storage flywheels. *IEEE Trans Transp Electrification*. 2021;7:2344–2355. doi: 10.1109/tte.2021.3079402
6. Wang JS, Zeng Y, Huang H, et.al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Physica C*. 2002;378–381(1): 809–814. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
7. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A high-temperature superconducting maglev-evacuated tube transport (HTS Maglev-ETT) test system. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2017;27(6):3602008. doi: 10.1109/TASC.2017.2716842
8. Kuhn L, de Haas O, Berger D. Supratrans II—Test drive facility for a superconductor based maglev train. *Elekt. Bahnen*. 2012;8:461–469. doi: 10.1109/TASC.2005.849636
9. Sotelo GG, Oliveira RAH, Costa FS, et.al. A full scale superconducting magnetic levitation vehicle operational line. *IEEE Trans. Appl. Supercond*. 2015;23(3):3601005. doi: 10.1109/TASC.2014.2371432
10. Hikihara T, Moon FC. Chaotic levitated motion of a magnet supported by superconductor. *Phys. Lett. A*. 1994;191(3/4):279–284. doi: 10.1016/0375-9601(94)90140-6
11. Hikihara T, Fujinami T, Moon FC. Bifurcation and multifractal vibration in dynamics of a high-Tc superconducting levitation system. *Phys. Lett. A*. 1997;231(3/4): 217–223. doi: 10.1016/S0375-9601(97)00305-8
12. Coombs TA, Campbell AM. Gap decay in superconducting magnetic bearings under the influence of vibrations. *Physica C*. 1996;256(3):298–302. doi: 10.1016/0921-4534(95)00670-2
13. Hull R. Superconducting bearings. *Supercond. Sci. Technol*. 2000;13(2):R1–R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
14. Wang J, Wang S, Zeng Y, et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world. *Physica C*. 2002;378–381:809–14. doi: 10.1016/S0921-4534(02)01548-4
15. Jha AK, Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy. *Frontiers in Physics, Review*. 2019;7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082

16. Barth C, Mondonico G, Senatore C. Electro-mechanical properties of REBCO coated conductors from various industrial manufacturers at 77 K, self-field and 4.2 K, 19 T. *Supercond. Sci. Technol.* 2015;28(4):045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
17. MacManus-Driscoll JL, Wimbush SC. Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors. *Nature Reviews Materials.* 2021;6(7):587–604. doi:10.1038/s41578-021-00290-3
18. Lee S, Petrykin V, Molodyk A, et al. Development and production of second generation high Tc superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. *Supercond. Sci. Technol.* 2014;27:044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
19. Tomków Ł, Mineev N, Smara A, et al. Theoretical analysis of heat transport in tilted stacks of HTS tapes at temperatures above 20 K. *Cryogenics.* 2020;105:103017. doi: 10.1016/j.cryogenics.2019.103017
20. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. 2012. pp. 34–68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
21. Patel A, Baskys A, Mitchell-Williams T, et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Supercond. Sci. Technol.* 2018;31(9):09LT01. doi:10.1088/1361-6668/aad34c
22. SuperOx [Internet]. [cited 2023 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
23. Martirosian IV, Pokrovskii SV, Osipov MA, et al. Simulation of the maglev suspension dynamic characteristics during movement, acceleration and deceleration. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;8(3):63–77. (In Russ.) EDN: FRVRIA doi: 10.17816/transsyst20228363-77
24. Osipov M, Anishenko I, Starikovskii A, et al. Scalable Superconductive Magnetic Bearing Based on Non-Closed CC Tapes Windings. *Supercond. Sci. Technol.* 2021;SUST-104182.R1. doi: 10.1088/1361-6668/abda5a
25. Anischenko IV, Osipov MA, Pokrovskii SV, et al. Magnetic Levitation Characteristics of the System of Permanent Magnet Stacks of HTS Tapes of Various Architectures. *Physics of Atomic Nuclei.* 2021;4(12):1982–1990. doi: 10.1134/S1063778821100045

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук;

инженер-исследователь;

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

E-mail: mephizic@gmail.com

Александров Дмитрий Александрович, инженер-исследователь;

ORCID: 0009-0001-7383-0094;

E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук,

заведующий научно-исследовательской лабораторией;

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

E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Information about the authors:

Irina V. Martirosian, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), research engineer;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

Dmitry A. Alexandrov, research engineer;
ORCID: 0009-0001-7383-0094;
E-mail: cfrfcfrfdima123@gmail.com

Sergey V. Pokrovskii, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory;
eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Igor A. Rudnev, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Lead Research Fellow;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 621.313.333

<https://doi.org/10.17816/transsyst625012>

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, А.А. Чехова, М.Ю. Дунаев

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

К ВОПРОСУ РЕГУЛИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обоснование. Разработка и исследование линейных асинхронных тяговых приводов для магнитолевитационного транспорта является достаточно актуальной задачей. Линейные асинхронные двигатели могут найти применение в качестве основных тяговых машин для перспективного транспорта и дополнительных для традиционного подвижного состава.

Цель. Исследование особенностей регулирования тягового линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента.

Материалы и методы. Аналитическим путем установлены соотношения для расчета сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента и пусковых тяговых усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя.

Результаты. Полученные соотношения позволили произвести расчеты пусковых сопротивлений короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента и тяговых усилий двигателя.

Заключение. Результаты исследования регулирования сопротивления короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента и пусковых тяговых усилий линейного асинхронного двигателя позволяют обоснованно выбрать рациональные режимы включения двигателя.

Ключевые слова: магнитолевитационный транспорт; регулируемый линейный асинхронный двигатель; короткозамкнутая обмотка вторичного элемента; пусковые режимы.

Как цитировать:

Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., Дунаев М.Ю. К вопросу регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 93–109. <https://doi.org/10.17816/transsyst625012>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnology and Electrophysics

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, A.A. Chekhov, M.Yu. Dunaev

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

ISSUE OF REGULATING THE RESISTANCE OF THE SHORT-CIRCUITED WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT OF A LINEAR INDUCTION MOTOR

Background. The development and research of linear induction traction drives for magnetic-levitation transport is an urgent task. Linear induction motors can be used as the main traction machines for advanced transport and as additional traction machines for traditional rolling stock.

Aim. This study aims to research on the features of regulation of a traction linear induction motor with variable resistance by short-circuited winding of the secondary element.

Materials and methods. The ratios for calculating the resistances of the short-circuited winding of the secondary and starting traction forces of an adjustable linear induction motor are analytically established.

Results. The obtained ratios made it possible to calculate the starting resistances of the short-circuited winding of the secondary element and the traction forces of the engine.

Conclusion. This study of the regulation of the resistance of the short-circuited winding of the secondary element and the starting traction forces of a linear induction motor provides guidance on choosing rational modes of switching on the motor.

Keywords: magnetic-levitation transport, adjustable linear asynchronous motor, short-circuited winding of the secondary element, starting modes.

To cite this article:

Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, Dunaev MYu. Issue of regulating the resistance of the short-circuited winding of the secondary element of a linear induction motor. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):93–109. <https://doi.org/10.17816/transsy625012>

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростной магнитнолевитационный транспорт (МЛТ) является новым и важным этапом эволюции транспортной системы во всем мире. Достижения науки, современные материалы и технологии сделали возможным создание принципиально новых высокоскоростных и комфортабельных видов транспорта, сочетающих высокие скорости перевозки пассажиров и грузов с высокой степенью безопасности движения. Магнитнолевитационный транспорт решает и ряд важных для общества экологических проблем. Значительных успехов в разработке МЛТ достигли российские инженеры и ученые [1–7]. Важным элементом магнитнолевитационного транспорта является линейный тяговый электрический привод. Одним из самых простых и экономичных вариантов является использование для тяги МЛТ привода на основе линейного асинхронного двигателя (ЛАД). Использование линейных асинхронных двигателей в качестве основного элемента тяговой системы МЛТ обеспечивает возможность эффективного электрического торможения транспортного средства. В настоящее время созданы конструкции ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток их вторичных элементов (ВЭ), обладающие характеристиками, сходными с асинхронными машинами с фазными обмотками роторов [8].

Представленная статья посвящена рассмотрению особенностей регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ и пуска в ход тягового линейного асинхронного двигателя новой конструкции.

О РЕГУЛИРОВАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Регулируемые линейные асинхронные двигатели, у которых можно изменять сопротивление короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, имеют хорошие перспективы для применения на высокоскоростном подвижном составе. Разработанные впервые в РГУПС, регулируемые ЛАД обладают всеми положительными свойствами асинхронных машин с фазными обмотками ВЭ, обладая при этом более простой конструкцией [8]. Короткозамкнутые обмотки регулируемых ЛАД образованы стержнями, состоящими из отдельных проводников, расположенных один над другим по высоте в каждом пазу. Стержни обмотки ВЭ закорочены с одной стороны общей электропроводящей шиной, а с другой – подвижным замыкающим

элементом. Подвижный элемент способен замыкать одинаковое количество проводников, образующих стержни вторичного элемента ЛАД. Сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ может плавно изменяться от бесконечности (когда все стержни обмотки разомкнуты) до его номинального (минимального) значения при замыкании всех проводников во всех пазах сердечника ВЭ.

Основы теории, описывающей процессы, происходящие при таком регулировании тягового линейного асинхронного двигателя, изложены в [8]. Диапазон регулирования тягового линейного асинхронного двигателя может быть расширен за счет изменения конструкции подвижного замыкающего элемента, который способен закорачивать неодинаковое количество проводников в разных пазах ВЭ или замыкать одновременно не все стержни короткозамкнутой обмотки. При таком изменении положения замыкающего элемента на разных стадиях регулирования ЛАД обмотка его ВЭ содержит разное количество стержней, причем эти стержни могут иметь разное сопротивление.

Возникает задача определения закономерностей регулирования, при котором для любого варианта выполнения короткозамкнутой обмотки ВЭ будет достигаться максимум тягового усилия при минимальных значениях токов в обеих обмотках линейного асинхронного двигателя. Основной задачей при проектировании ЛАД является определение оптимальных значений чисел пазов (z_2) ВЭ и количества, равномерно размещенных по длине вторичного элемента, пазов (n), сопротивления стержней которых регулируются, при заданном числе пар полюсов (p) тягового линейного асинхронного двигателя.

Механическое тяговое усилие, развиваемое ЛАД с короткозамкнутой обмоткой ВЭ, представляет собой сумму векторных произведений токов в стержнях и магнитной индукции в воздушном зазоре. При симметричном (равномерном) размещении стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ векторная диаграмма электродвижущих сил (ЭДС) и токов будет представлять собой правильную звезду как на рис.1 [9].

Продemonстрируем наглядно, как будут распределяться токи в стержнях короткозамкнутой обмотки вторичного элемента представленного линейного асинхронного двигателя при $z_2 = 12$. Для этого используем векторную диаграмму (рис. 2).

Введены некоторые обозначения. Так, сопротивление обмотки ВЭ, где установлены стержни, параллельно друг другу, примем z_c , а сопротивление между этими стержнями, попарно соединенных между

собой шиной – $z_{ш}$. Угол сдвига α между векторами ЭДС и токов соседних

стержней обмотки составит $\alpha = \frac{2\pi p}{z_2}$.

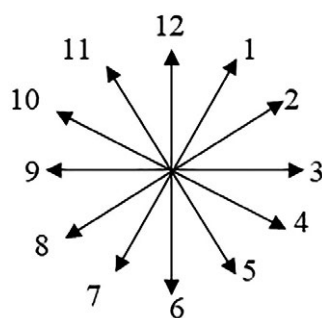


Рис. 1. Векторная диаграмма ЭДС и токов стержней короткозамкнутой обмотки ВЭ

Fig. 1. Vector diagram of the EMF and currents of the short-circuited winding of the SE rods

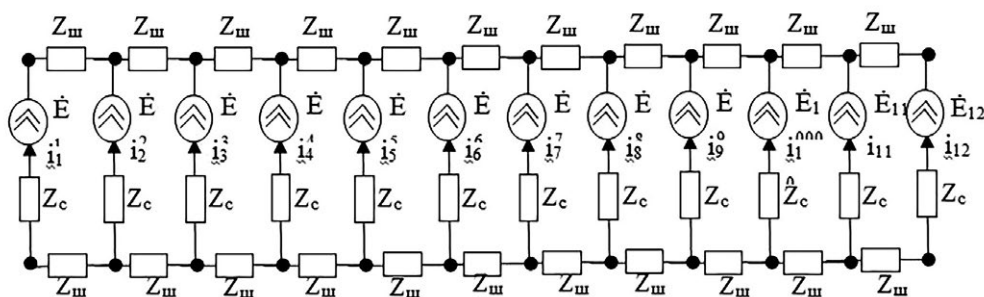


Рис. 2. Электрическая схема замещения короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД ($z_2=12$)

Fig. 2. Electrical equivalent circuit of a short-circuited winding of the secondary element of the adjustable LIM ($z_2=12$)

Для решения данной задачи будет необходимо спроецировать векторы токов стержней вторичного элемента ЛАД на вещественные и мнимые полуоси декартовой системы координат. Подставив значения активных сопротивлений, получим правильную токовую звезду, применяя метод контурных токов. Данное обстоятельство свидетельствует о максимальном пусковом усилии в начальный момент движения, что, несомненно, является преимуществом для высокоскоростного МЛТ. Спроецируем векторы токов полученной правильной звезды на оси декартовой системы координат. Достаточным будет определить проекции векторов токов только на одну вещественную ось и одну мнимую полуось.

будут сдвинуты на одинаковый угол $\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ относительно друг друга.

На этот же угол будут сдвинуты и соответствующие токи.

Рассмотрим проекцию каждого вектора звезды токов на полуось системы координат рис. 1. Предположим, что в самом общем случае сопротивления соседних стержней изменяются неодинаково. Возможен и такой способ управления ЛАД. В этом случае суммы проекций векторов токов могут отличаться от сумм проекций при симметричном регулировании. Если суммы проекций на оси координат при равномерном регулировании сопротивления стержней будут меньше, чем при неравномерном изменении активного сопротивления в соседних стержнях, то изменения количества стержней ВЭ ЛАД и корректировка значений их сопротивления не окажут влияния на корректную работу машины. При уменьшении количества стержней в обмотке вторичной части или же уменьшения значений сопротивления стержней короткозамкнутой обмотки могут возникать пульсации тягового механического усилия в линейном асинхронном двигателе. Чтобы избежать этого негативного эффекта при неравномерном регулировании сопротивления вторичной части, необходимо добиться плавной звезды, т.е. векторы, образующие звезду токов, должны распределялись по окружности, как можно плавнее и не налегать друг на друга. Кроме того, векторы ЭДС (рис. 2) также не должны накладываться друг на друга и быть попарно различными.

Установим условия, при которых выполняется отмеченное ограничение. Исследуем в каком случае $\exp(j0) - \exp(j\alpha)$; $\exp j\left(\frac{z_2}{n}\alpha\right) - \exp\left[j\left(\frac{z_2}{n} + 1\right)\alpha\right]$; $\exp\left[j\frac{(n-1)z_2}{n}\alpha\right] - \exp\left[j\left(\frac{n-1}{n}z_2 + 1\right)\alpha\right]$ – суть попарно различные числа.

Из математики известно, что числа $\left\{e^{2\pi j \frac{pm}{n}}\right\}_{m=0}^{n-1}$ попарно различны

тогда и только тогда, когда $\exp\left(2\pi j \frac{p}{n}\right)$ является первообразным корнем

из единицы [10]. В свою очередь для выполнения этого условия необходимо и достаточно, чтобы были и взаимно просты $((p, n) = 1)$.

Рассмотрим разности экспонент при условии $((p, n) = 1)$.

$$\Delta_1 = \exp\left(2\pi j \frac{pm}{n}\right) - \exp\left(\left(2\pi \frac{pm}{n} + \alpha\right)j\right);$$

$$\Delta_1 = \exp\left(2\pi j \frac{pl}{n}\right) - \exp\left(\left(2\pi \frac{pl}{n} + \alpha\right)j\right); \quad (3)$$

для любых значений $l, m \in N$, расположены на отрезке $[0, n-1]$.

Докажем, что $\Delta_1 \neq \Delta_2$, если $l \neq m$. Действительно, равенство $\Delta_1 = \Delta_2$ эквивалентно системе двух равенств

$$\begin{cases} R_e \Delta_1 = R_e \Delta_2; \\ I_m \Delta_1 = I_m \Delta_2. \end{cases} \quad (4)$$

Разложим первое равенство из выражения (4) на следующий вид

$$\cos\left(2\pi \frac{pm}{n}\right) - \cos\left(2\pi \frac{pm}{n} + \alpha\right) = \cos\left(2\pi \frac{pl}{n}\right) - \cos\left(2\pi \frac{pl}{n} + \alpha\right). \quad (5)$$

Применив тригонометрическую формулу разности косинусов, $\cos x - \cos y = -2 \sin \frac{x-y}{2} \sin \frac{x+y}{2}$, преобразуем равенство (5) в следующий

$$\text{вид } \sin\left(\frac{2\pi pm}{n} + \frac{\alpha}{2}\right) = \sin\left(\frac{2\pi pl}{n} + \frac{\alpha}{2}\right).$$

Используя тригонометрическую формулу разности синусов, равенство (5) будет эквивалентно

$$\sin\left(\frac{\pi p(m-1)}{n}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p(m+1)}{n} + \frac{\alpha}{2}\right) = 0. \quad (6)$$

Так как $m \neq l$, $0 \leq m$, $l \leq n-1$, $(p, n)=1$, то $\sin \frac{\pi p(m-l)}{n} \neq 0$.

Следовательно, выполнение данного равенства (6) возможно лишь при условии

$$\frac{\pi p(m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} = \pm \frac{\pi}{2} + \pi k, \quad (7)$$

где $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$

Исследуем теперь равенство $I_m \Delta_1 = I_m \Delta_2$, представив его в виде

$$\sin \frac{2\pi p m}{n} - \sin \left(\frac{2\pi p m}{n} + \alpha \right) = \sin \frac{2\pi p l}{n} - \sin \left(\frac{2\pi p l}{n} + \alpha \right). \quad (8)$$

Используем формулу разности синусов

$$\sin x - \sin y = 2 \sin \frac{x-y}{2} \cos \frac{x+y}{2}. \text{ и получим равенство}$$

$$\cos \left(\frac{2\pi p m}{n} + \frac{\alpha}{2} \right) = \cos \left(\frac{2\pi p l}{n} + \frac{\alpha}{2} \right). \quad (9)$$

Учитывая, что $m \neq l$, опираясь на выражение (5), получим

$$\sin \left(\frac{\pi p (m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} \right) = 0. \quad (10)$$

Данное равенство возможно (8), лишь при условии

$$\frac{\pi p (m+l)}{n} + \frac{\alpha}{2} = \pi k, \quad (11)$$

где $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$

При этом нарушается справедливость равенств (7) и (11), их данные противоречат друг другу.

Для выполнения данного неравенства $\Delta_1 \neq \Delta_2$, следует соблюсти условия $(p, n) = 1$. В рассмотренном общем случае возможно значительное снижение пульсаций тягового усилия при пуске в ход и в процессе регулирования скорости ЛАД. Если же имеется возможность симметричного регулирования сопротивления стержней обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя, то ее надо использовать для полного исключения пульсаций тягового усилия.

Иными словами, при симметричном регулировании сопротивлений стержней обмотки вторичного элемента ЛАД достигается возможность получения максимального пускового усилия и отсутствия его пульсаций при трогании с места высокоскоростного магнитнолевитационного поезда.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РЕГУЛИРУЕМОГО ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ

Одним из недостатков линейных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми обмотками вторичных элементов является относительно низкое пусковое усилие. Низкое пусковое усилие замедляет процесс трогания высокоскоростного экипажа МЛТ с места. В РГУПС создан ряд новых конструкций линейных асинхронных двигателей с регулированием величины сопротивлений короткозамкнутых обмоток вторичных элементов [8]. Важным преимуществом тяговых линейных асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента является регулирование скорости движения в широком диапазоне, увеличено пусковое усилие машины в момент начала движения, при этом значения силы тока снижены. Так как асинхронный двигатель, разработанный в РГУПС, по своим параметрам и положительным характеристикам схож с фазным асинхронным двигателем, то для дальнейшего его исследования рассмотрим теорию асинхронной машины с фазной обмоткой ротора.

Поставлена задача определения оптимальной величины сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД, при котором обеспечивается максимум пускового усилия при минимуме токов в обеих обмотках линейного двигателя. В этом случае будут уменьшены потери мощности при трогании высокоскоростного экипажа МЛТ с места. В теории асинхронных двигателей с фазным ротором пусковое сопротивление цепи ротора, при котором момент будет максимальным $r_2'(M_{n\max})$, определяется при приравнивании к единице выражения, определяющего скольжение, соответствующее максимальному моменту. В данном случае имеем почти полную аналогию с регулируемым ЛАД. Решение поставленной задачи сводится к определению сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового ЛАД $r_2'(F_{n\max})$, соответствующего максимальному значению пускового усилия при трогании с места высокоскоростного экипажа магнитолевитационного транспорта. Используя теорию асинхронной машины с фазным ротором, дадим определение зависимости $r_2'(F_{n\max})$ и далее продифференцируем зависимость $F_n = f(r_2')$.

Скольжение вторичного элемента относительно индуктора ЛАД при максимальном тяговом усилии при пуске в ход определяется соотношением

$$S_m = \frac{r_2'}{x_k}, \quad (12)$$

где r_2' – приведенное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ; x_k – сопротивление короткого замыкания ЛАД.

Полагая $S_m = 1$, получаем что $r_2' = x_k$.

Для расчета тягового усилия регулируемого ЛАД в режиме пуска определим значение тока во вторичном элементе.

Приведенный пусковой ток I_{2n}' в короткозамкнутой обмотке ВЭ определяется соотношением

$$I_{2n}' = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}} + \frac{1240\delta \cdot a_1 \cdot x_{ne} (x_{no} + k_x x_{ne})}{N [r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2]}, \quad (13)$$

где δ – воздушный зазор; U_1 – фазное напряжение индуктора; a_1 – число пар параллельных ветвей обмотки индуктора; N – число пар эффективных проводников в пазу индуктора; x_{no} – индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения; x_{ne} – индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения; k_x – коэффициент индуктивного сопротивления рассеяния, зависящего от насыщения (при открытых и полузакрытых пазах вторичного элемента $k_x = 0,0825$).

После ряда преобразований получено алгебраическое уравнение 8-й степени, корни которого не выражаются в радикалах [10]

$$\begin{aligned} r_k^8 \cdot \frac{1}{4r_1} + r_k^7 + r_k^6 \left(r_1 - \frac{4C}{r_1} \right) + r_k^5 (7C - X^2) + r_k^4 \left(2r_1 X^2 - \frac{X^4}{2r_1} - 2C \cdot r_1 - \frac{4C \cdot X^2}{r_1} \right) + \\ + r_k^3 (X^4 + 8C \cdot X^2) + r_k^2 (r_1 X^4 + C^2 r_1 - 2C \cdot r_1 X^2) + r_k (X^6 + C \cdot X^4) + \frac{X^3}{4r_1} = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где $C = \frac{1537600\delta^2 \cdot a_1 \cdot x_{ne} \cdot X^2}{N^2 \cdot U_1^2}$; $X = x_{no} + k_x x_{ne}$.

Общий вид решения уравнения (14) в математике отсутствует, для упрощения задачи, второй член уравнения (13) приравняем к нулю.

Полученное соотношение, определяющее ток в обмотке вторичного элемента ЛАД в момент начала движения, имеет вид

$$I'_{2n} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}}. \quad (15)$$

Численным методом произведены расчеты пусковых токов во вторичных элементах ряда линейных асинхронных двигателей и сопоставлены полученные данные при учете и без учета второго слагаемого в формуле (13). Выполнена оценка полученной погрешности при обнулении второго слагаемого. Полученные результаты сведены в табл. 1. Средняя погрешность при не учете второго члена в (13) составляет 12%. Однако, пренебрежение вторым членом уравнения (13) значительно упрощает решение задачи и расчеты. Полученная погрешность вполне допустима при инженерных расчетах.

Кратность пускового тягового усилия ЛАД по отношению к номинальному по аналогии с [11] представлена в виде

$$\frac{F_{\Pi}}{F_H} = \frac{m_1 (I'_{2n})^2 r'_2 (1 - S_H)}{P_H}, \quad (16)$$

где S_H – скольжение в номинальном режиме.

Подставляя в (16) соотношение (15) и заменяя r'_2 на $r_k - r_1$, получим

$$\frac{F_{\Pi}}{F_H} = \frac{m_1 (1 - S_H)}{P_H} \cdot \left(\frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}} \right)^2 \cdot (r_k - r_1). \quad (17)$$

Продифференцировав (17) по r_k , после ряда упрощений получим

$$\frac{d(F_{\Pi} / F_H)}{dr_k} = r_k - 2r_1 r_k - (x_{no} - k_x x_{ne}). \quad (18)$$

При учете, что правая часть равенства (18) будет равна нулю, единственным корнем уравнения будет

$$r_k = r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{no} + k_x x_{ne})^2}. \quad (19)$$

Заменив r_k на r'_2 , получим соотношение, позволяющее установить кратность увеличения сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового ЛАД.

Сравним результаты расчетов, полученные путем вычисления из соотношений для регулируемых тяговых ЛАД, с результатами, выполненными на ЭВМ в табл. 1.

Таблица 1. Пусковые соотношения ЛАД с короткозамкнутым ВЭ

Table 1. Starting ratios of the LIM with short-circuited SE

Тип ЛАД, P_n/V , кВт/(м/с)	Данные расчетов при учете второго члена в (3.13)		Данные расчетов без учета второго члена в (3.13)		Погрешность, %	
	$r'_{2п} / r'_{2н}$	F_n / F_n	$r'_{2п} / r'_{2н}$	F_n / F_n	$r'_{2п} / r'_{2н}$	F_n / F_n
4/50	6,41	3,12	5,49	3,11	19,9	0,31
7,5/75	13,15	3,23	11,02	3,21	16,2	0,74
40/50	7,70	4,97	6,69	4,95	13,1	0,40
45/75	23,20	3,25	19,55	3,22	11,7	0,95
250/50	27,01	2,38	25,20	2,37	6,7	0,59
440/100	29,10	3,22	27,52	3,21	5,4	0,12

Зависимость $F_n / F_n = f(r'_{2п} / r'_{2н})$, рассчитанная для тягового ЛАД мощностью 45 кВт с номинальной скоростью 75 м/с, представлена графически на рис. 3.

На основании данных табл. 1 можно сделать заключение о том, что соотношение для определения пускового сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, соответствующего максимальному значению пускового усилия ЛАД, не является точным, однако пусковое усилие при таком сопротивлении незначительно отличается от определенного точным численным методом максимального значения. Это объясняется тем, что на значительном участке функция $F_n / F_n = f(r'_{2п} / r'_{2н})$ оказалась выпуклой (см. рис. 3) и имеет малую вариацию, т.е. при существенном изменении r'_2 величина F_n меняется незначительно и происходит это как раз в окрестности точки экстремума (максимума) этой зависимости.

Изучив полученную характеристику, можно сделать вывод, что при изготовлении регулируемого линейного асинхронного двигателя, возможны некоторые технологические допущения, так, например,

при работе с подвижными замыкающими элементами для стержней короткозамкнутой обмотки вторичной части.

Предложенный в Уральском Федеральном университете (УрФУ-УПИ) метод расчета характеристик ЛАД на основе детализированных схем замещения [12], может быть применён для изучения тяговых линейных машин, созданных для транспорта на магнитном подвесе.

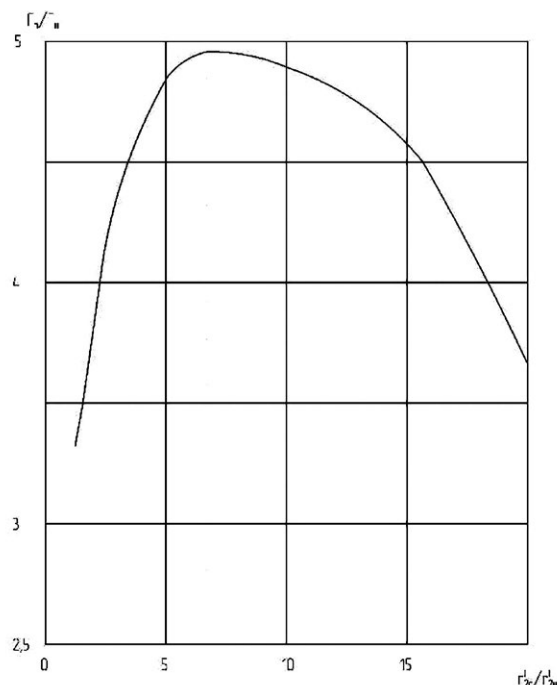


Рис. 3. Зависимость кратности пускового усилия регулируемого ЛАД от сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента

Fig. 3. Dependence of the multiplicity of the starting force of the adjustable LIM from the resistance of the short-circuited winding of the secondary element

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для общего случая, когда в регулируемом тяговом линейном асинхронном двигателе изменяют сопротивление не всех стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для получения максимального значения пускового механического усилия установлены критерии:

$$\begin{cases} \frac{z_2}{n} \in N; \\ (n, p) = 1. \end{cases}$$

2. Максимальное пусковое усилие регулируемого тягового ЛАД для высокоскоростных поездов достигается, если стержни короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, сопротивление которых изменяется равномерно, расположены по длине линейного двигателя.
3. Более равномерное распределение векторов токов стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента тягового ЛАД обеспечивается, если количество регулируемых стержней и число пар полюсов двигателя являются взаимно простыми числами.
4. Исследована зависимость пускового усилия регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя от сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Установлено, что эта зависимость имеет максимум.
5. Соотношения, полученные для определения сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента являются достаточно точными для инженерных расчетов.
6. Доказана возможность наличия больших допусков при изготовлении вторичных элементов регулируемых тяговых ЛАД, т.к. при существенном изменении пускового сопротивления пусковое тяговое усилие (на определенном интервале) меняется незначительно (см. рис. 3).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Ростовского государственного университета путей сообщения.

Авторы заявляют, что:

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

The authors state that:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Талашкин Г.Н. Транспорт на магнитном подвесе. СПб.: ПГУПС, 2011.

3. Антонова Ю.Ф., Зайцева А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
4. Зайцев А.А., Морозова Е.И., Талашкин Г.Н. и др. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны. СПб.: НП-Принт, 2015.
5. Зайцев А.А., Соколова Я.В. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 12. С. 62–65. EDN: BYVZPT
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. 2014. № 5. С. 69–73. EDN TDGFZB
7. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А., Морозова Е.И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия ПГУПС. 2014. № 4 (41). С. 5–15. EDN: TDWZWN
8. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель // Электротехника. 2004. № 12. С. 31–34.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.
10. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968.
11. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Л.: Энергия, Ч. 2, 1973.
12. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТИ–УПИ, 2001.

REFERENCES

1. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya*. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ.)
2. Zaitsev AA, Sokolova IaV, Talashkin GN. *Transport na magnitnom podvese*. 2nd ed. St. Petersburg: PGUPS; 2011. (In Russ.)
3. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitatsionnyy transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
4. Zaitsev AA, Morozova EI, Talashkin GN, Sokolova YaV. *Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany*. St. Petersburg: NP-Print; 2015. (In Russ.)
5. Zaitsev AA, Sokolova YaV. *O sovremennoi stadii razvitiya magnitolevitatsionnogo transporta*. *Railway transport*. 2016;12:62–65. (In Russ.) EDN: BYVZPT
6. Zaitsev AA. *Magnitolevitatsionnyye transportnyye sistemy i tekhnologii*. *Railway transport*. 2014;5:69–73. (In Russ.) EDN TDGFZB
7. Antonov JF, Zaitsev AA, Morozova EI. *Issledovanie magnitodinamicheskoi levitatsii i elektrodinamicheskogo tormozheniya gruzovoi transportnoi platformy*. *Proceedings of Petersburg state transport University*. 2014;4(41):5–15. (In Russ.) EDN: TDWZWN
8. Solomin AV. *Reguliruyemyy lineynyy asinkhronnyy dvigatel'*. *Electrical engineering*. 2004;12:31–34. (In Russ.)
9. Vol'dek AI. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1978. (In Russ.)

10. Kurosh AG. *Kurs vysshei algebry*. Moscow: Nayka; 1968. (In Russ.)
11. Kostenko MP, Piotrovskiy LM. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1973. (In Russ.)
12. Sarapulov FN, Sarapulov SF, Shymchak P. *Matematicheskie modeli lineinykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameshcheniya*. Ekaterinburg: GOU VPO UGTI–UPI; 2001. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Соломин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Чехова Анастасия Алановна, аспирант;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: ema@rgups.ru

Дунаев Михаил Юрьевич, аспирант;

eLibrary SPIN: 5923-9415; ORCID: 0009-0002-8747-4059;

E-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors:

Vladimir A. Solomin, Doctor of Sciences in Engineering, Professor;

eLibrary SPIN: 6785-9031; ORCID: 0000-0002-0638-1436;

E-mail: ema@rgups.ru

Andrei V. Solomin, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

Anastasia A. Chekhova, Graduate;

eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;

E-mail: ema@rgups.ru

Mikhail Yu. Dunaev, Graduate;

eLibrary SPIN: 5923-9415; ORCID: 0009-0002-8747-4059;

E-mail: ema@rgups.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

УДК [UDC] 625.088+7/.8.05

DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst624992>

© Д.А. Филиппов¹, Н.А. Ермошин²

¹ Военная академия материально-технического обеспечения
(Санкт-Петербург, Россия)

² Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ВОЗВЕДЕНИЮ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ EPS-БЛОКОВ

Цель. Разработка технологических решений по возведению дорожных конструкций из EPS-блоков для устройства насыпей на грунтах с низкой несущей способностью.

Методы. Обоснование рассматриваемых решений выполнено на основе применения методов сетевой оптимизации и экспериментальных исследований.

Результаты. Предложена оригинальная конструкция технологического оборудования, позволяющая повысить эффективность дорожно-строительных работ.

Заключение. Мобильный комплекс по производству блоков пенополистирола может быть использован для строительства автомобильных дорог в отдаленных районах с неблагоприятными грунтово-гидрологическими условиями, а также для восстановления автомобильных дорог при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Ключевые слова: мобильное производство; пенополистирол; легкие насыпи; строительство и восстановление автомобильных дорог.

Как цитировать:

Филиппов Д.А., Ермошин Н.А. Технологические решения по возведению дорожных конструкций из EPS-блоков // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 110–124. <https://doi.org/10.17816/transsyst624992>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

© **D.A. Filippov¹, N.A. Ermoshin²**

¹ Military Academy of Logistics (St. Petersburg, Russia)

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF ROAD STRUCTURES FROM EPS-BLOCKS

Aim. This study aims to develop technological solutions for constructing road structures from EPS blocks for building embankments on soils with low load-bearing capacity.

Methods. The justification of the considered solutions is based on the application of network optimization methods and experimental studies.

Results. An original design of technological equipment is proposed to increase the efficiency of road construction works.

Conclusion. The mobile complex for the production of polystyrene foam blocks can be used for the construction of highways in remote areas with unfavorable soil and hydrological conditions and for the restoration of highways in the aftermath of natural and human-made emergencies.

Keywords: mobile production, expanded polystyrene, light embankments, construction and restoration of highways.

To cite this article:

Filippov DA, Ermoshin NA. Technological solutions for the construction of road structures from EPS blocks. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):110–124. <https://doi.org/10.17816/transsyst624992>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из условий успешного освоения и развития отдаленных регионов России является наличие транспортных коммуникаций, в особенности – автомобильных дорог, которые необходимы для доставки материальных средств жизнеобеспечения людей, продукции производственно-технического назначения, технологического оборудования на формируемые производственные предприятия и т.д. При этом главной проблемой транспортного строительства в этих регионах становится отсутствие технических и технологических решений по строительству автомобильных дорог в короткие сроки при минимизации затрат ресурсов в сложных природно-климатических и грунтово-геологических условиях [1].

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Практика освоения нефтегазовых месторождений и других природных ресурсов, а также строительство новых населенных пунктов и промышленных предприятий свидетельствует о сложности организации строительства автомобильных дорог в условиях значительного удаления от стационарных объектов производственной базы дорожного хозяйства. В этих условиях необходимо привлечение дополнительных ресурсов для транспортирования дорожно-строительных материалов и конструкций к объектам производства работ. Естественным способом сокращения сроков дорожного строительства и затрат на выполнение дорожно-строительных работ является разработка технических и технологических решений по созданию мобильных дорожно-строительных комплексов, комплектов машин и оборудования [2]. Для разработки таких комплексов должны применяться технические и технологические решения, позволяющие повысить прочностные характеристики и экономичность дорожных конструкций, на основе применения современных инновационных материалов.

Появление на рынке новых безопасных и экологичных дорожно-строительных материалов позволяет разрабатывать технологии их применения в дорожном строительстве. Одним из перспективных, относительно новых, но уже хорошо зарекомендовавших себя, материалов, является пенополистирол [3, 4]. Это жесткий пенопласт, обладающий уникально низкой удельной плотностью ($20 \dots 65 \text{ кг/м}^3$), достаточной прочностью и долговечностью. Наряду с геосетками, геотекстилем и геомембранами пенополистирол относится к категории геосинтетических материалов. Однако, его производство организовано на стационарных

предприятиях, расположенных в крупных промышленных центрах, что затрудняет его использование при строительстве новых участков дорог на удаленных территориях.

Более того, благодаря своим физико-механическим свойствам пенополистирол является перспективным материалом для восстановления участков автомобильных дорог, разрушенных в результате воздействия техногенных и природно-климатических факторов.

Для разработки технологических решений по возведению дорожных конструкций из EPS-блоков и XPS-плит необходимо рассмотреть эксплуатационные свойства и физико-механические характеристики пенополистирола. Они приведены в Табл.

Анализ данных таблицы показывает, что XPS-плиты целесообразно использовать для устройства основания дорожных одежд, а EPS-блоки –

Таблица. Характеристики изделий из пенополистирола [5, 6]

Table. Characteristics of products made of polystyrene foam [5, 6]

Наименование показателя	Единицы измерения	Величина показателя		
		EPS-блоки Thermit	XPS-плиты тип 45	XPS-плиты тип 75
Плотность	кг/м ³	5–50	40–47	40–53
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации	МПа	0,1–0,5	0,5	0,7
Предел прочности при изгибе, не менее*	МПа	0,2–0,6	0,35–0,7	0,35–0,7
Модуль упругости	МПа	18	18	20
Водопоглощение за 24 часа, не более	% по объему	0,2–0,4	0,3	0,2
Коэффициент паропроницаемости	мг/(м ч Па)	0,08	0,006	0,006
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м °С)	0,025–0,03	0,030	0,033
Температурный диапазон эксплуатации	°С	-50....+80	-50....+75	
Стандартные размеры	длина	мм	3000; 5000	2400;4000; 4200;4500
	ширина	мм	1000; 1200	600
	толщина	мм	600; 1000	40; 50;60;80; 100

* зависит от толщины плиты (блока)

для возведения легких насыпей земляного полотна на грунтах со слабой несущей способностью [7].

В связи с тем, что технология производства работ должна базироваться на разработке проектов дорожных конструкций, необходимо учитывать общие принципы их проектирования [8]. Главный принцип конструирования и расчета легких насыпей заключается в снижении удельной нагрузки на слабое основание за счет уменьшения веса дорожной конструкции. Уменьшение нагрузки может быть достигнуто применением для ее устройства материалов, имеющих значительно меньшую плотность, чем грунт.

Расчет устойчивости основания, при строительстве легких насыпей, выполняют исходя из условия, что расчетная нагрузка P_o от тела насыпи должна быть меньше или равна безопасной нагрузке P_o^p на основание [9]:

$$P_o \leq P_o^p, \quad (1)$$

При этом, безопасную нагрузку на основание можно определить по формуле:

$$P_o^p = \gamma_n^{cp} h_n, \quad (2)$$

где γ_n^{cp} – средневзвешенный удельный вес насыпи, при котором обеспечивается выполнение условия (1); h_n – расчетная высота насыпи, которая определяется в соответствии с требованиями руководящих документов [10, 11].

На рис. 1 приведена принципиальная схема конструкции легкой насыпи с использованием EPS-блоков.

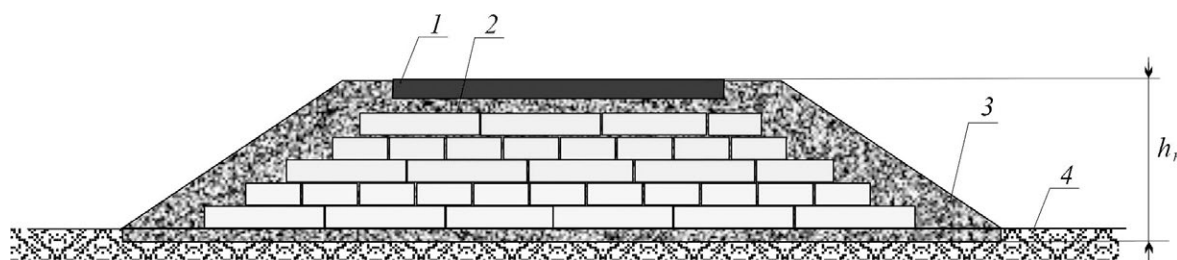


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции легкой насыпи с использованием EPS-блоков:

1 – дорожная одежда; 2 – EPS-блоки; 3 – присыпные обочины из привозного песчаного грунта; 4 – местный грунт со слабой несущей способностью; h_n – высота насыпи

Fig. 1. Schematic diagram of the design of a light embankment using EPS blocks:
1 – road clothing; 2 – EPS blocks; 3 – powdered shoulders made of imported sandy soil; 4 – local soil with weak bearing capacity; h_n – embankment height

Представленная схема позволяет утверждать, что около $2/3$ тела легкой насыпи составляют EPS-блоки. Это говорит о потребности в большом количестве данного материала, а также необходимости максимального приближения его производства к участкам строительства легких насыпей.

ОПИСАНИЕ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для разрешения указанной проблемы предлагается использование мобильного комплекса по производству дорожных конструкций из пенополистирола. Предлагаемый комплекс запатентован [12] и представляет собой технологическую линию, позволяющую производить блоки экспандированного пенополистирола (EPS-блоки), имеющие требуемые физико-механические характеристики и геометрические параметры.

Комплекс может использоваться для производства EPS-блоков в условиях отсутствия стационарной электросети, когда производство необходимо максимально приблизить к объекту выполнения строительных работ. В частности, для строительства дорог на заболоченной местности, восстановления разрушенного земляного полотна автомобильных дорог, сооружения оперативных проездов и временных технологических дорог на слабых грунтах, а также в арктической и субарктической климатических зонах. Перспективным направлением использования EPS-блоков является их применение для восстановления автомобильных дорог при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и в военное время, когда сроки выполнения восстановительных работ крайне ограничены, а электроэнергия в стационарной сети отсутствует, либо подается с перебоями [1].

В предлагаемом мобильном комплексе для производства дорожных конструкций из пенополистирола технологическое оборудование устанавливается на быстросъемные платформы и перевозится на трех автомобилях повышенной проходимости (для обеспечения доставки оборудования в районы со сложными погодными-климатическими условиями и слабо развитой дорожной сетью) и трех прицепах (рис. 2).

На шасси (первого автомобиля) крепится платформа с оборудованием для вспенивания и стабилизации гранул пенополистирола. В состав оборудования входят: емкость для исходного материала с дозатором гранул, выполненная в виде бункера; рабочая камера для вспенивания гранул; струйный насос с разъемами для подключения пневмотрубопроводов

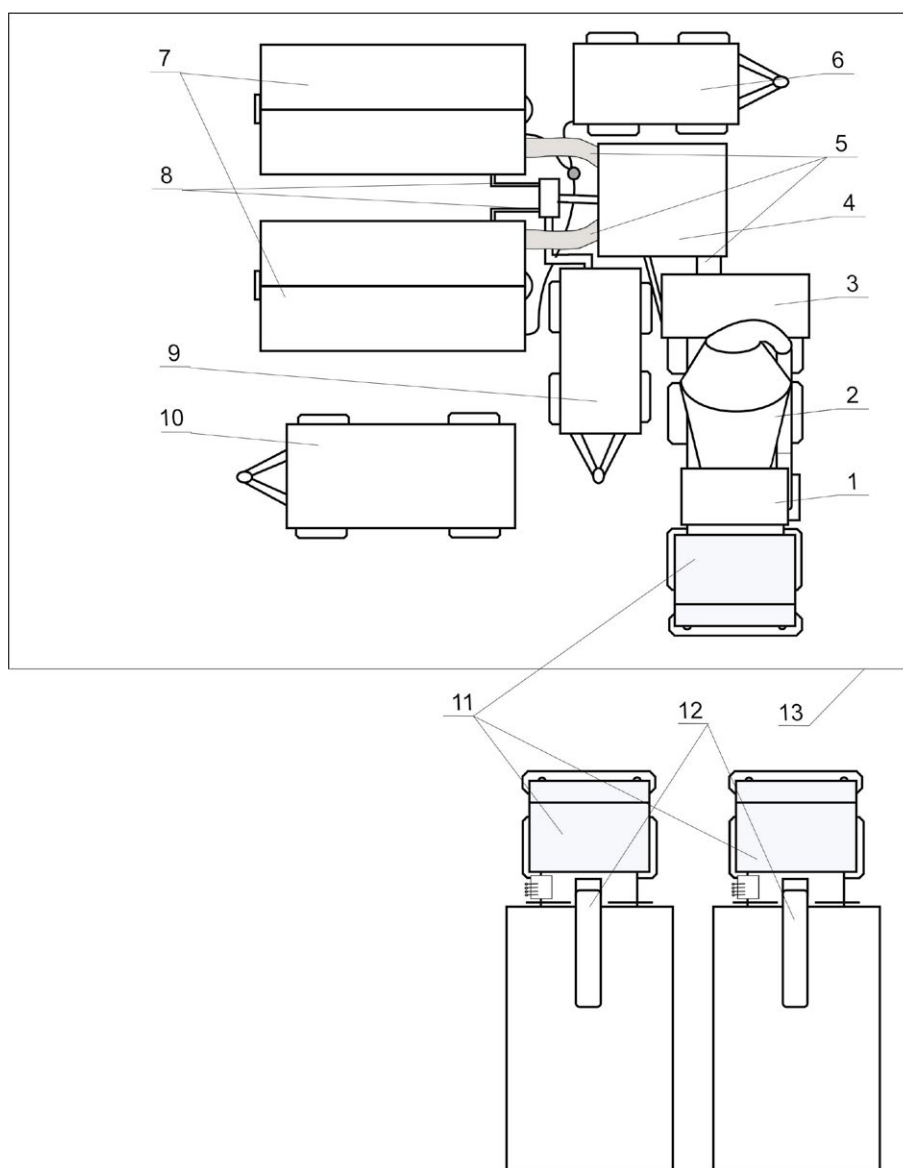


Рис. 2. Схема мобильного комплекса по производству блоков пенополистирола:
 1 – емкость для исходного материала с дозатором гранул полистирола; 2 – рабочая камера для вспенивания гранул, с емкостью для воды и механизмом ее подачи; 3 – камера сушки и охлаждения; 4 – бункер для вылеживания гранул; 5 – материалопроводы; 6 – дизельная электростанция; 7 – блок-формы; 8 – пневмотрубопроводы; 9 – компрессорная станция (источник сжатого воздуха); 10 – прицеп для транспортировки каркаса с тентом и оборудования; 11 – автомобильные шасси; 12 – кран-манипулятор; 13 – тентованное производственное помещение

Fig. 2. Scheme of a mobile complex for the production of polystyrene foam blocks:
 1 – container for starting material with a dispenser of polystyrene granules; 2 – working chamber for foaming granules, with a container for water and a mechanism for supplying it; 3 – drying and cooling chamber; 4 – bunker for aging granules; 5 – material pipelines; 6 – diesel power plant; 7 – block forms; 8 – pneumatic pipelines; 9 – compressor station (source of compressed air); 10 – trailer for transporting the frame with an awning and equipment; 11 – automobile chassis; 12 – crane-manipulator; 13 – tented production room

от источника сжатого воздуха и материалопроводов, а также камера сушки и охлаждения с регулируемой заслонкой. При этом, рабочая камера для вспенивания гранул имеет встроенную емкость для воды с механизмом ее подачи, сверхвысокочастотный нагреватель и механизм для перемешивания гранул в ходе приготовления.

На быстросъемных платформах второго и третьего автомобилей устанавливаются блок-формы для изготовления блоков пенополистирола. Такие автомобили оборудуются краном-манипулятором, который позволяет снимать и устанавливать платформы с производственным оборудованием на шасси мобильного комплекса.

В качестве источника сжатого воздуха используется компрессорная станция производительностью 5,6 м³/мин, а в качестве источника питания – дизельная электростанция 380 В, мощностью 30 кВт, смонтированные на двух прицепных шасси.

Третий прицеп рассчитан под перевозку элементов каркаса и тента для оборудования производственного помещения под размещение мобильного комплекса. Кроме того в прицепе транспортируются составные части сборно-разборного бункера вылеживания гранул, а также материалопроводы, пневмотрубопроводы с регулируемыми заслонками, элементы кабельной сети и другое технологическое оборудование.

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО РЕШЕНИЯ

Основным преимуществом предлагаемого комплекса для производства дорожных конструкций из пенополистирола является его мобильность и автономность. Использование в качестве базового шасси автомобилей повышенной проходимости позволяет обеспечить его перемещение в условиях бездорожья, а наличие в составе комплекса электростанции не требует его подключения к стационарным источникам электрической энергии. При этом, производственное оборудование располагается на быстросъемных платформах, что позволяет без особых усилий и затрат времени снимать его с шасси и устанавливать обратно на время транспортировки. Последнее обстоятельство позволяет, после демонтажа технологического оборудования, высвободить два грузовых автомобиля повышенной проходимости, оборудованные кранами-манипуляторами, которые можно использовать для погрузки и доставки изготовленных комплексом EPS-блоков непосредственно на место их укладки.

В отличие от существующих технологий производства пенополистирола предлагается новый способ вспенивания гранул

пенополистирола. Преимущество такого способа заключается в том, что вспенивание гранул производят в поле СВЧ в вертикальной камере-волноводе под воздействием пара, образующегося во всем объеме между загруженными гранулами за счет испарения при нагреве СВЧ-излучением воды [13]. Указанный способ не требует использования внешнего источника пара, а оборудование для его реализации имеет габариты, допускающие возможность монтажа на автомобильное шасси.

Использование специальных замковых устройств для качественной фиксации и быстрого соединения материалопроводов, пневмотрубопроводов и элементов кабельной сети мобильного комплекса, повышает надежность его эксплуатации [14] и обеспечивает быстрый запуск производства после очередного перемещения.

Следует отметить, что известные линии для изготовления пенополистирола являются стационарными и требуют длительного процесса монтажа и настройки в случае перемещения производства [15].

Технология изготовления блоков из пенополистирола такова, что готовый блок превосходит по объему исходный материал, используемый на его изготовление в 20–30 раз. На основе данного факта становится понятно, что затраты времени и материальных средств на доставку исходного сырья для производства блоков к мобильному комплексу будут в десятки раз меньше, чем на доставку готовой продукции от стационарного производства к месту строительства. Это можно подтвердить несложными расчетами:

$$T_v = T_p + t_d + t_y + T_z, \quad (3)$$

где T_v – общее время на восстановление участка дороги; T_p – время на выполнение подготовительных работ; t_d – время на доставку EPS-блоков; t_y – время на укладку EPS-блоков; T_z – время на завершение работ по восстановлению участка дороги.

При прочих равных условиях, основным показателем, который будет изменяться для стационарной установки и мобильного комплекса является t_d – время доставки требуемого количества EPS-блоков, зависящее от величины плеча подвоза (рис. 3).

Представленный график наглядно показывает, что использование мобильного комплекса значительно сокращает время на строительство (восстановление) участка автомобильной дороги на слабом основании.

Не менее важным обстоятельством, обуславливающим необходимость разработки и применения мобильного комплекса по производству

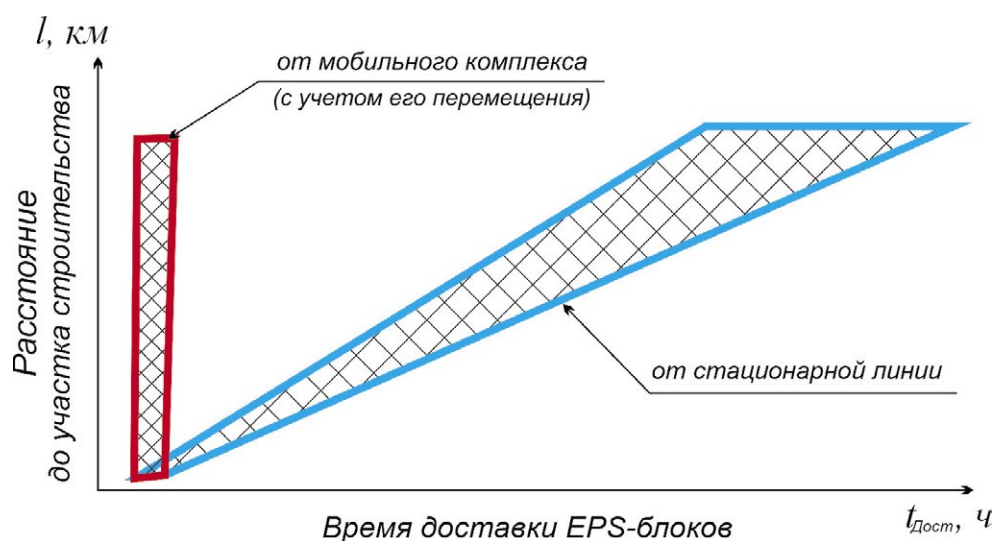


Рис. 3. График зависимости времени доставки EPS-блоков на объект строительства от удаленности производства

Fig. 3. Graph of the dependence of the time of delivery of EPS blocks to the construction site on the remoteness of production

дорожных конструкций из пенополистирола, является его более высокая экономическая эффективность по сравнению со стационарными технологическими линиями.

Это подтверждается результатами сравнительного анализа затрат при восстановлении (строительстве) участка дороги с использованием стационарной линии и мобильного комплекса.

Для сравнения рассматриваются суммарные затраты на производство и доставку готовых EPS-блоков.

$$C = \sum_j^m C_{jP} + \sum_i^n C_{iD}, \quad (4)$$

где C – общие удельные затраты на восстановление участка дороги;

$\sum_j^m C_{jP}$ – суммарные удельные затраты на производство блоков пенополистирола;

$\sum_i^n C_{iD}$ – суммарные удельные затраты на доставку готовых блоков пенополистирола к месту строительства.

Зависимость этих затрат от объемов производства показана на рис. 4.

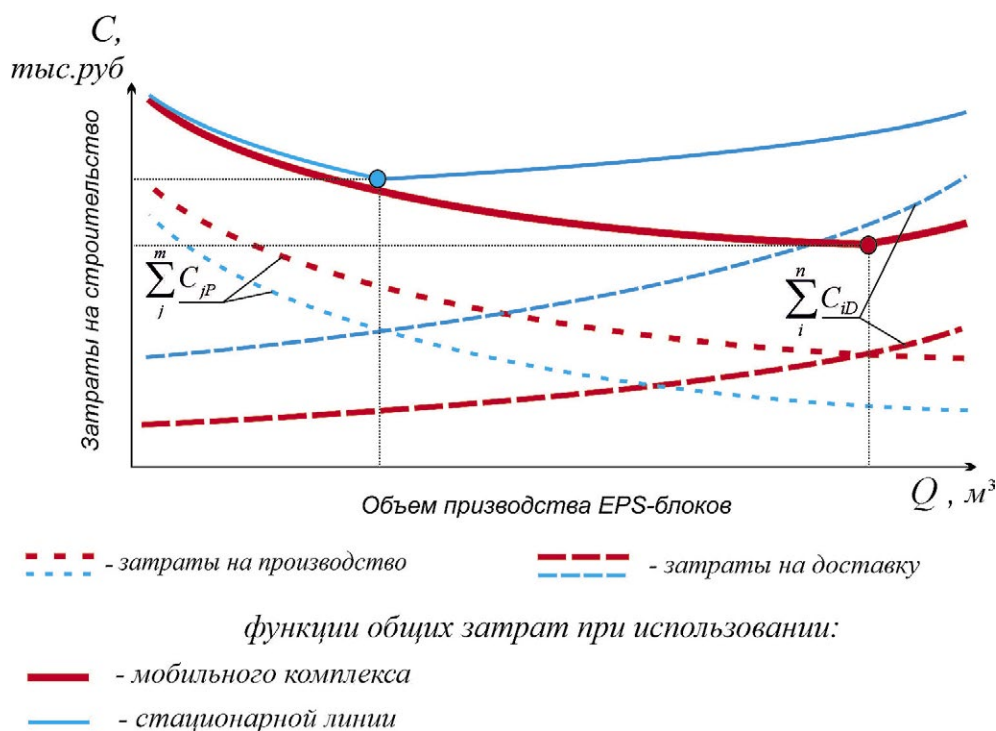


Рис. 4. График зависимости затрат от объемов производства

Fig. 4. Graph of the dependence of costs on production volumes

Как видно из рисунка функция общих затрат имеет точку оптимума соответствующую оптимальному объему производства EPS-блоков при минимальных суммарных затратах.

Сравнение этих затрат для стационарной линии и мобильного комплекса по предварительным расчетам позволяет сделать вывод о том, что применение мобильных установок для строительства и восстановления автомобильных дорог выгоднее с экономической точки зрения. Дополнительно к этому стоит учесть более короткие сроки доставки EPS-блоков и строительства дорожных конструкций в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для окончательной разработки и внедрения мобильного комплекса по производству дорожных конструкций из пенополистирола в практику строительства, реконструкции и восстановления автомобильных дорог требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Основными задачами настоящих исследований является определение технических характеристик и параметров технологического оборудования для мобильных технологических линий по производству

экспандированного пенополистирола, обоснование способов их применения в дорожном строительстве, оценка надежности работы мобильных комплексов в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций, а также оптимизация технологий изготовления и транспортировки изделий на объекты выполнения работ.

Авторы заявляют что:

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

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. Ермошин Н.А., Егосин А.М., Лазарев Ю.Г., и др. Проблемы и методологические аспекты организации дорожной деятельности в интересах военной безопасности государства монография. СПб: Р-КОПИ, 2017.
2. Ермошин Н.А. Филиппов Д.А. Технология скоростного восстановления земляного полотна автомобильных и железных дорог. В кн.: Транспорт России: проблемы и перспективы — 2018: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 года. Том 1. СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2018. С. 223–228.
3. Применение блоков из пенополистирола в дорожном строительстве. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <http://dorhoz.ru/news/primenenie-blokov-iz-penopolistirola-v-dorozhnom-stroitelstve.php>
4. Geofoam – Structural Insulation Engineered Light Weight Fill Material. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <https://www.insulfoam.com/geofoam-structural-insulation/>
5. Экспандированный пенополистирол. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: http://xn--80ajbnhehmdihidodj.xn--p1ai/catalog/teploizolyatsionnye_materialy/thermit_ekstrudirovanny_penopolistirol/
6. Экструдированный пенополистирол. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <http://www.penoplex.ru/products/>
7. Евтюков С.А., Медрес Е.П., Медрес Е.Е., и др. О проблеме проектирования и расчета конструкции облегченных насыпей из пенополистирольных блоков на слабых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6(77). С. 271–276. doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-6-271-276
8. ГОСТ Р 59172-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Насыпи облегченные и комбинированные из вспененных полистирольных блоков (ППС блоков). Правила проектирования и применения. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200177512>

9. ОДМ 218.3.1.006-2021 Методические рекомендации по проектированию легких насыпей на слабых основаниях с применением легких геокомпозиционных материалов. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/odm-21831006-2021.pdf>
10. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200095524>
11. ОДМ 218.3.120-2020 Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах основания с применением геосинтетических материалов. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/odm-2183120-2020.pdf>
12. Патент РФ на изобретение № 2687920/ 16.05.2019. Бюл. № 14. Филиппов Д.А., Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г. и др. Мобильный комплекс по производству блоков пенополистирола. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38147228_43509347.PDF
13. Патент РФ на изобретение № 2446046/ 27.03.2012. Бюл. № 9. Капустин А.И., Золотовский И.О., Светухин В.В. и др. Микроволновой способ вспенивания гранул пенополистирола. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37762084_50559823.pdf
14. Кравченко И.Н., Адилходжаев А.И., Кондращенко В.И. и др. Инженерные методы повышения надежности машин и технологического оборудования. Ташкент: Транспорт, 2021.
15. Насонов П.А., Шадрин В.С., Агапитов А.И., и др. Экструдированный пенополистирол в строительстве. В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации». 07–09 декабря 2016 года. Омск: СибАДИ, 2016. С. 300–305. Дата обращения: 20.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28180281_97969949.pdf

REFERENCES

1. Ermoshin NA, Egoshin AM, Lazarev JuG, et al. *Problemy i metodologicheskie aspekty organizatsii dorozhnoy deyatelnosti v interesah voennoy bezopasnosti gosudarstva*. St. Petersburg: R-KOPI; 2017 (In Russ.)
2. Ermoshin NA, Filippov DA. *Tecnologiya skorostnogo vosstanovleniya zemlyanogo polotna avtomobilnyh i jeleznyh dorog*. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Transport Rossii: problemy i perspektivy". 2018 November 13–14; St. Petersburg*. St. Petersburg: SPb UGPS MChS RF; 2018:223–228. (In Russ.)
3. Application of polystyrene foam blocks in road construction. [internet] Cited: 20.12.2023. Available from: <http://dorhoz.ru/news/primeneniye-blokov-iz-penopolistirola-v-dorozhnom-stroitelstve.php>
4. Geofoam – Structural Insulation Engineered Light Weight Fill Material. [Internet]. Cited: 20.12.2023. Available from: <https://www.insulfoam.com/geofoam-structural-insulation/>

5. Expanded polystyrene foam [Internet] Cited: 20.12.2023. Available from: http://xn--80ajbnhehmdihidodj.xn--p1ai/catalog/teploizolyatsionnye_materialy/thermit_ekstrudirovanny_penopolistirol/
6. Extruded polystyrene foam [Internet] Cited: 20.12.2023. Available from: <http://www.penoplex.ru/products/>
7. Evtykov SA, Medres EP, Medres EE, et al. On the problem of design and calculation of lightweight embankment structures constructed of polystyrene foam blocks on soft soils. *Vestnik AmGU*. 2019;6(77):271–276. (In Russ). doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-6-271-276
8. GOST R 59172-2020 Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Nasypi oblegchyonnyy i kombinirovanny iz vspennyykh polistyrolnykh blokov (PPS blokov) Pravila projectirovaniya i primeneniya. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200177512>
9. ODM 218.3.1.006-2021 Metodicheskiye rekomendacyy po proektirovaniyu legkih nasypey na slabyyh osnovaniyakh s primeneniem legkih geocompozitsionnykh materialov (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/odm-21831006-2021.pdf>
10. SP 34.13330.2012 Avtomobilnye dorogi. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200095524>
11. ODM 218.3.120-2020 Metodicheskiye rekomendacyy po raschetu nasypey avtomobilnykh dorog na slabyyh gruntakh osnovaniya s primeneniem geosinteticheskikh materialov. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/odm-2183120-2020.pdf>
12. Patent RUS № 2687920 / 16.05.2019. Byul. № 14. Filippov DA, Ermoshin NA, Lazarev YG, et al. Mobilnyy kompleks po proizvodstvu blokov penopolistirola. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38147228_43509347.PDF
13. Patent RUS № 2446046 / 27.03.2012. Byul. № 9. Kapustin AI, Zolotovskiy IO, Svetuhin VV, et al. Microvolnovyy sposob vspenivaniya penopolistirola. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37762084_50559823.pdf
14. Kravchenko IN, Adilhodjaev AI, Kondrashenko VI, et al. *Injenernyye metody povysheniya nadezhnosti mashin i tekhnologicheskogo oborudovaniya*. Tashkent: Transport; 2021. (In Russ).
15. Nasonov PA, Shadrin VS, Agapitov AI, et al. Extrudirovanny penopolistirol v stroitelstve. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Architekturno-stroitelnyy i dorojno-transportnyy complex: problemy, perspektivy, novacyi”*. 2016 December 7–9; Omsk. Omsk: SibADI; 2016:300–305. (In Russ.) Cited: 20.12.2023. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28180281_97969949.pdf

Сведения об авторах:

Филиппов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, докторант;

eLibrary SPIN: 7923-7855; ORCID: 0009-0001-4272-4045;

E-mail: ppdlx01@mail.ru

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор, профессор

Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства;

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

E-mail: ermonata@mail.ru

Information about the authors:

Dmitry A. Filippov of the first author, Candidate of Sciences in Engineering;

eLibrary SPIN: 7923-7855; ORCID: 0009-0001-4272-4045;

E-mail: ppdlx01@mail.ru

Nikolay A. Yermoshin of the second author, Doctor of Military Sciences, Professor;

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

E-mail: ermonata@mail.ru

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

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

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 331.103

<https://doi.org/10.17816/transsyst625011>

© А.В. Быстров, А.В. Давыдов

Сибирский государственный университет путей сообщения

(Новосибирск, Россия)

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД УПРАВЛЕНИЯ УЧАСТКОВОЙ СИСТЕМОЙ РЕМОНТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Разработка научно-практического инструментария оценки влияния эффективности участковой системы управления модернизацией и текущим содержанием железнодорожного пути.

Методы. Для оценки процесса внедрения современных, прорывных технологий, с точки зрения определения временных затрат труда и степени их модификации, используется метод математического моделирования бизнес-процессов.

Результаты. Разработана модель организации механизированного процесса капитального ремонта пути, рассчитана экономическая эффективность использования спутниковой навигации при капитальном ремонте пути.

Заключение. Внедрение цифровых технологий контроля глубины вырезки балластной призмы при работе щебнеочистительных машин относительно соседнего пути успешно заменяют трудовой процесс замеров горизонтальной рейкой с нивелирным уровнем под внутренней нитью ремонтируемого пути и исключают технологические остановки машин и снижают время выполнения работ машин и персонала, а также снижают эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: процессный подход; участковая система; инфраструктура железной дороги; капитальный ремонт.

Как цитировать:

Быстров А.В., Давыдов А.В. Процессный подход управления участковой системой ремонта железнодорожного пути // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 125–141. <https://doi.org/10.17816/transsyst625011>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

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

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

© A.V. Bystrov, A.V. Davydov

Siberian State Transport University

(Novosibirsk, Russia)

PROCESS APPROACH TO MANAGING A SITE RAILROAD REPAIR SYSTEM

Aim. This study aims to develop a scientific and practical tool for assessing the influence of the effectiveness of the district system of modernizing and current maintenance of railway tracks.

Methods. To evaluate the process of introducing modern breakthrough technologies in terms of determining the time costs of work and the degree of their modification, the mathematical modeling method of business processes is used.

Results. A model of the organization of the mechanized process of capital overhaul of the track was developed, and the economic efficiency of using satellite navigation during capital overhaul of the track was calculated.

Conclusion. The introduction of digital technologies to control the depth of the ballast prism cutout during the operation of gravel-cleaning machines relative to the adjacent track successfully replaces the labor process of measuring with a horizontal rail with a leveling under the inner thread of the repaired track, excludes technological stops of machines, and reduces the time of work of machines and personnel and operational costs.

Keywords: process approach, district system, railway infrastructure, capital repair.

To cite this article:

Bystrov AV, Davydov AV. Process approach to managing a local railway track repair system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):125–141. <https://doi.org/10.17816/transsyst625011>

ВВЕДЕНИЕ

Инфраструктурный комплекс железной дороги – это производственная среда, в которой, происходят существенные изменения трудовых и технологических процессов в результате значительной их оптимизации. Характерной особенностью любого современного производства является поэтапное развитие потребительских свойств, продукции или оказываемых услуги в течение их жизненного цикла, где в рамках каждой стадии развития происходит непрерывное улучшение специфических и потребительских свойств [1].

К специфическим особенностям продукции инфраструктурного комплекса железной дороги относятся [2]:

- ремонт и текущее содержание рельсовой колеи;
- техническая сложность их производства, требующая затрат квалифицированного и инженерного труда;
- изменение стоимости при замене аналога, в расчете на единицу получаемого эффекта.

В транспортных системах при создании принципиально новых продуктов труда и услуг, действует жесткая классическая схема *«исследование – производство – потребление»*.

На этапе «исследование» необходимо определить в отношении новых технических средств труда:

- тенденции в формировании технических средств труда;
- технические средства труда и их деловой цикл;
- эконометрические модели технических средств труда;
- технические средства труда в моделях «вход – выход»;
- модели для анализа факторов, формирующих технические средства труда.

Что касается этапа «производство» – это предпочтительно новые технологии, ориентированных на применение новых технических средств и методов труда, то на этом этапе необходимы:

- определение и классификация внедряемых новых технологий;
- влияния стоимости различных технологий, на конечную стоимость оказываемых услуг.

Инфраструктура железной дороги – это взаимосвязанный комплекс эксплуатационных, технических и технологических взаимосвязей и факторов, обеспечивающих перевозку грузов и пассажиров при доступном уровне транспортных тарифов, не снижающих конкурентоспособность услуг и не сдерживающих

развитие экономических связей и деловой активности и подвижности населения [3].

В области транспортных коммуникаций превалирующими являются организационные, технические и технологические проблемы качественного содержания верхнего строения пути. С точки зрения теории систем научно-технический прогресс в этой сфере экономики должен быть направлен либо на предоставление новых транспортных услуг, удовлетворяющих вновь возникающие или существующие потребности в перевозках более эффективными способами, либо на оказание услуг в том же ассортименте, но с меньшими затратами, т.е. оказание услуг–новинок.

При этом под услугой–новинкой следует понимать качественно новую услугу, имеющую усовершенствования по сравнению с уже представленными на рынке перевозок.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективное функционирование современной системы управления путевым комплексом железной дороги возможно благодаря ускоренному, широкомасштабному и повсеместному внедрению комплекса современных информационных и цифровых технологий на всех уровнях производственной деятельности при постоянном изменении внешней окружающей среды [4].

Изменениям характера функционирования рынка транспортных услуг, произошедшим за два последних десятилетия, относятся:

- радикальная реструктуризация и формирование цифровых бизнес-процессов, реинжиниринг бизнес-процессов, реинжиниринг бизнес-процессов, синхронизацию логистических цепочек «поставщик–потребитель»;
- появление новых технологий планирования ресурсов–затрат предприятия и управления взаимоотношениями с покупателями;
- концентрация управления на определяющих факторах ведения участковой системы ремонта железнодорожного пути и передача второстепенных процессов дочерним или аутсорсинговым компаниям.

Процессный подход в управлении путевым комплексом железной дороги как сложной производственной системой, способствует сохранению целостности системы, упрочнение связей и соподчинение ее элементов, снижает системные противоречия и повышению качества оказываемых услуг [5].

Системная же интеграция в принципе увеличивает возможности дальнейшего развития систем за счет сохранения и усиления связей и соотношений в степени большей, чем простое сложение. Здесь возможности системы возрастают именно за счет синергических связей (см. табл. 1).

Эффект синергизма в производственной деятельности достигается, когда удельная прибыль повышается за счет согласованного использования ресурсов.

Участковая транспортная система ремонта пути, исходя из основной коммуникативной функции транспорта, должна быть: дистрибутивной, всеситуационной, гибкой, непрерывно действующей, оперативно управляемой и экономичной [6].

При дистрибуции – объем, целостность и качество распределяемой и продвигаемой продукции, направляемой от изготовителя к потребителю, и величина финансового потока в обратном направлении не изменяются ни при каких обстоятельствах.

Оптимизация состава участников системы (см. рис. 1) и выбор метода распределения работ между ними осуществляются на основе сетевой модели (см. рис. 2), для которой исходными данными являются:

1. Множество работ (R), которые необходимо выполнить для реализации доставки пассажира (заданного груза).

Таблица 1. Основные показатели и ограничения при выборе участников системы

Table 1. Main indicators and restrictions when choosing system participants

Показатели	Способ учета показателя
Тариф на перевозку в зависимости от расстояния	Зависимость стоимости услуги от времени её выполнения
Возможность скидок с тарифа	Зависимость стоимости от объемов перевозок
Надежность выполнения участником системы своих обязательств	Коэффициент надежности участника K_n
Качество работ	Коэффициент качества K_k
Возможность дальнейшего сотрудничества	Коэффициент возможностей дальнейшего сотрудничества K_c
Временные ограничения, учитываемые при выборе участников системы	
Максимальная дальность рейса	$T\Sigma$
Время и скорость доставки	$t_{R_1}^{нач}, t_{R_1}^{оконч}$

2. Перечень участников (П) транспортной системы и существующая их загруженность.
 3. Каждый участник P_i характеризуется множеством работ $R_{Pi} \in R$, которые он может выполнять.
 4. Для каждой работы R_i , вводится множество вариантов ее размещения.
- Кроме того, разработана система интегральных показателей, позволяющих на единой основе оценить различные варианты реализации функций участковой системы ремонта пути.

Суть функциональной (процессной) модели в виде графического представления состоит в формировании ее на наиболее общем уровне детализации и дальнейшей детализации каждого ранее сформированного уровня. Исходные данные, отражающие условия участников транспортной системы, приведены в табл. 2.

В транспортных системах в настоящее время необходимо в первую очередь сфокусировать внимание на рационализации организации транспортных процессов и процессов менеджмента через их фазовую технологичность (см. рис. 3). Рациональность при этом заключается в принятии решения с таким расчетом, чтобы с помощью имеющихся ресурсов обеспечить реализацию целевой функции, а технологичность организации менеджмента направлена на эффективное функционирование

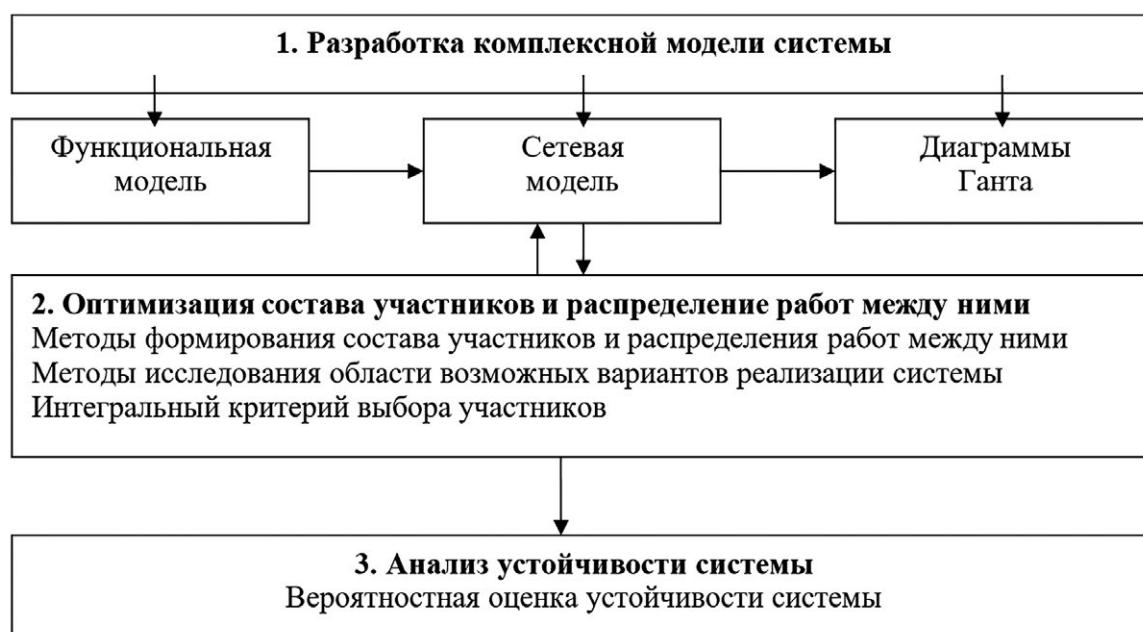
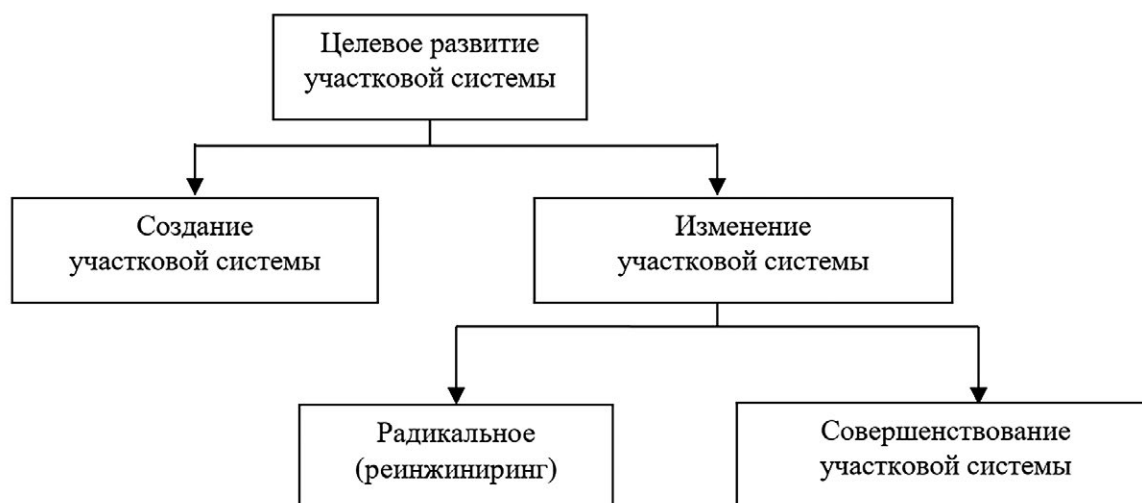


Рис. 1. Этапы оптимизации участковой транспортной системы

Fig. 1. Stages of optimization of a local transport system

Таблица 2. Исходные данные участников процесса**Table 2.** Initial data of the participants in the process

Исходные данные	Возможные участники Π_j				
	Участник Π_1		...	Участник Π_N	
Работы, выполняемые Π_j	R_1	R_2		R_3	R_4
Зависимость стоимости выполнения работы от срочности её выполнения	$S_{R_1}^{\Pi_1} = f(T)$	$S_{R_2}^{\Pi_1} = f(T)$		$S_{R_N}^{\Pi_N} = f(T)$	$S_{R_3}^{\Pi_N} = f(T)$
Зависимость стоимости выполнения работы от объема работ	$S_{R_1}^{\Pi_1} = f(Q)$	$S_{R_2}^{\Pi_1} = f(Q)$		$S_{R_N}^{\Pi_N} = f(Q)$	$S_{R_3}^{\Pi_N} = f(Q)$

**Рис. 2.** Сетевая модель транспортной системы**Fig. 2.** Network model of the transport system

элементов хозяйственного механизма в целях оптимизации ресурсов-затрат.

Технологическая организованность во времени – это организационно-технологическая последовательность процессов создания ценности, а в пространстве – это организация процессов в физической структуре предприятия и их метрическое сопровождение.

Организационно-технологическое развитие предполагает создание, освоение и широкое применение современных технологий, совершенствование технологического оснащения, технологического образования и обучения, технологической безопасности, технологической дисциплины всех видов общественно полезной деятельности и эффективности менеджмента (см. рис. 3) [7].

Технологически организованная система управления и ресурсы предприятия становятся на транспорте более надежной основой для стратегического развития, нежели изменчивые переменные внешней среды и запросы рынка. Приоритеты при этом должны соответствовать перспективным направлениям формирования современных ресурсосберегающих технологий и своевременного создания заделов становления следующих.

Однако, при внедрении современных технологий управления надо учитывать, что любая социально-экономическая система обладает инерционностью, которая предохраняет ее от случайных и конъюнктурных потерь, неверных управленческих решений. И здесь индикатором глубины инерционности выступает показатель достаточности оборотных средств или с платежеспособности предприятия [8].



Рис. 3. Факторы развития путевого комплекса в современной транспортной системе

Fig. 3. Factors in the development of the track complex in the modern transport system

Для оценки процесса внедрения современных, прорывных технологий, с точки зрения определения времени и степени необходимой их модификации, используем метод математического моделирования бизнес-процессов.

Как таковой, бизнес-процесс описывается с двух сторон: внешней и внутренней (см. рис. 4).

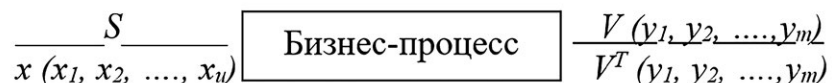


Рис. 4. Внешнее и внутреннее содержание бизнес-процесса

Fig. 4. External and internal content of the business process

Внешнюю сторону бизнес-процесса характеризует вектор частных абсолютных показателей функционирования $V(y_1, y_2, \dots, y_m)$, каждый из которых определяется на m -мерном множестве абсолютных показателей RV , т.е. $y_i \in RV$, где $i=1, m$. Внутреннее состояние бизнес-процесса описываем на двух уровнях: на уровне структуры S и на уровне параметров X функционально-процессных элементов его структуры. Здесь главное:

- определить функционирование бизнес-процесса для его существующего внутреннего состояния, т.е.

$$S, X \rightarrow V, \quad (1)$$

- описать бизнес-процесс по его существующему функционированию, т.е.

$$V^T \rightarrow S^0, X^0. \quad (2)$$

Далее находим безусловный экстремум многомерной функции многих переменных:

$$\min K(X), \quad (3)$$

где $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ количество участников бизнес процесса.

При определении описания бизнес-процесса по его существующему функционированию накладываем прямые ограничения на переменные структуры X_i , которые определяют область поиска D в пространстве R_x переменных. Интегральный показатель устойчивости деятельности предприятия есть функция β показателей $f(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots)$.

Задачей организации системы управления является достижение максимальной организованности системы при определенной ее сложности или же уменьшение сложности при определенном уровне организованности [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание предлагаемой методики содержит в своей основе общие подходы комплексного экономического анализа и измерители результативности деятельности, которые учитывают специфику машинизированного процесса капитального ремонта пути.

На проектных уровнях машинизированного капитального ремонта и модернизации пути перечень таких задач включает:

1. Определение условий и объемов работ по механизированному капитальному ремонту с использованием парка путевых машин и путевых технологических комплексов.
2. *Выбор технологической и информационной системы реализации производственного процесса ремонта и модернизации пути, обеспечивающих связь между ними.*
3. *Разработку пооперационной структуры процесса и выбор средств управления их реализации.*

При реализации процесса капитального ремонта пути перечень оптимизационных задач включает [10]:

1. Разработку единых планов и оптимального распределения путевой техники и трудовых ресурсов в процессе модернизации и ремонте пути в границах предоставления технологического «окна» на заданном участке ремонта.
2. Разработку единого технологического процесса работы техники и вспомогательных средств, включающего организационные, информационные и технические меры по обработке исходных данных процесса модернизации и ремонта пути, технологию работы по отдельным операциям обработки и нормативы времени на их выполнение, сроки и порядок движения специализированного подвижного состава и путевых машин.
3. Выбор оптимального режима и временного графика исполнения.
4. Распределение пооперационных и производственных функций для вспомогательного персонала.
5. Расстановку и использование технических средств и трудовых ресурсов.

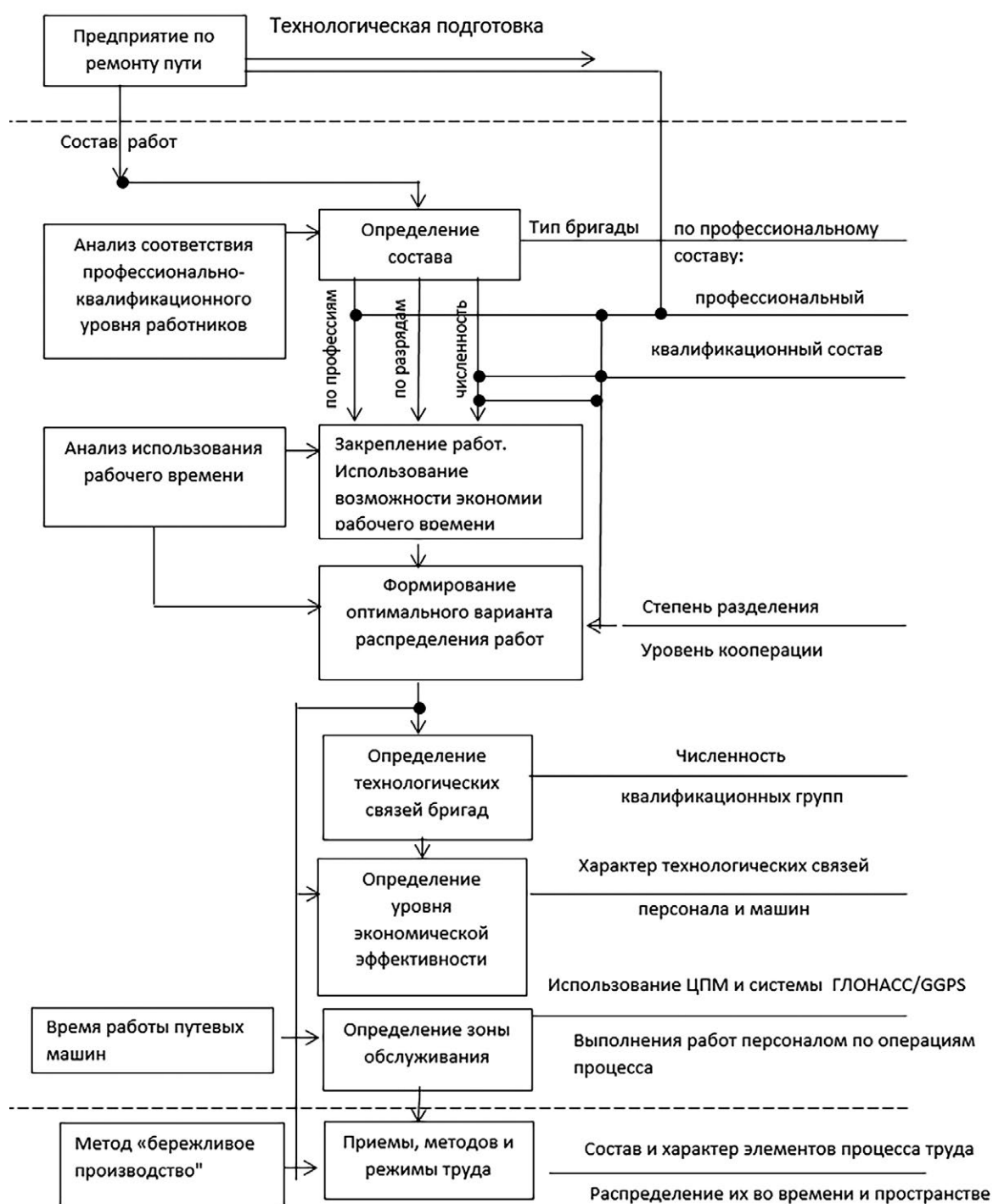


Рис. 5. Модель организации механизированного процесса капитального ремонта пути

Fig. 5. Model of organizing a mechanized process of track overhaul

6. Оптимизацию технологических параметров с использованием базы данных системы ГЛОНАСС/GPS и вспомогательных спутниковых станций.
7. Расстановку транспортных комплексов и машин.
8. Оптимизацию оперативных решений и распоряжений.

Исключительно важный ключевой показатель в процессе ремонта пути – это снижение времени производственного процесса для выполнения в полном объеме комплекса технологических операций и оценки добавления ценности создаваемого продукта труда. Имеется в виду рабочее время, и его отдельные стадии при проведении ремонта пути с использованием современных информационных систем и системы ГЛОНАСС [11].

Математическую формулировку задачи можно представить, как задачу линейного программирования: требуется определить значения переменных t_{ij} , которые входят в систему ограничений, и при которых целевая функция вида

$$T = \sum_{i=0}^n \cdot \sum_{j=0}^m \cdot t_{ij} w_{ij} \rightarrow \min \quad (4)$$

реализуется при следующих ограничениях:

$$t_{ij} \geq 0, w_{ij} \geq 0, A_k \leq t_{ij} \leq B_k, \quad (5)$$

где: i — элементов j -ой операции; j — индекс операции технологического процесса; n — число элементов в j -ой операции; m — число операций, входящих в общую технологию; t_{ij} — требуемая трудоемкость i -го элемента j -ой работы, мин; w_{ij} — объем выполняемый по i -му элементу j -ой работы; k — индекс группы ограничений, $k = 1, d$; A — минимальные затраты труда на операцию по данным цифровых систем, мин.; B — технологически необходимые затраты труда, мин.

Первая группа ограничений требует не отрицательности переменных, вторая — соблюдения при проектировании нормы перечня организационно-экономических, психофизиологических, а также социальных ограничений.

Вторая группа ограничений предусматривает используемые методы труда и способов его организации являются допустимыми, при которых ограничения по требуемому производственному результату выполняются, а также соблюдаются психофизиологические, санитарно-гигиенические и социальные условия труда работников в режиме *on-line*

технологического процесса и характеризующим организацию процесса ремонта пути по новой технологии выполнения работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За счет использования глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS осуществляется реализация намеченных целей процесса капитального ремонта пути (см. рис. 6).

При оптимизации технологии разбивочные работы сведены до минимума на основании информационных данных мониторинга выполненного процесса с использованием автоматического передвижного



Рис. 6. Оптимизация подготовительно-заключительных операций капитального ремонта пути

Fig. 6. Optimization of preparatory and final operations track overhaul

комплекса АПК «Профиль» выявлено, что сокращение оперативного времени на работы не добавляющего ценность из 605 минут нормативного времени составило 128 мин., а добавляющего ценность 387 мин.

Тогда норма времени на технологический процесс ремонта на одного километра железнодорожного пути составила 515 минут, что обеспечивает величину экономического эффекта в 3,162 тыс. руб., или в расчете на год экономический эффект составит 315,25 тыс. руб. Внедрение цифровых технологий контроля глубины вырезки балластной призмы машинами СЧ, РМ относительно соседнего пути успешно заменяют трудовой процесс замеров горизонтальной рейкой с нивелирным уровнем под внутренней нитью ремонтируемого пути и исключают остановку машин по 2 минуты на каждые 100 метров и снижают время выполнения работ машин и персонала на 86 минут, а так же снижает эксплуатационные расходы на 70,1 тысячу рублей на один километр пути.

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. Винокурцева В.А. Применение участковой системы содержания пути в путевом хозяйстве железнодорожного транспорта: региональный аспект // Вопросы экономики и управления. 2019. № 3 (19). С. 33–37. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: <https://moluch.ru/th/5/archive/126/4146> EDN: WAXGAD
2. Давыдов А.В. Организационные основы управления трудовыми ресурсами на железнодорожном транспорте. В кн.: Экономика, инновации и научные исследования в транспортном комплексе региона: проблемы и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Хабаровск, 27–28 октября 2017 г. Хабаровск: ДВГУПС. 2017. С. 62–69. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_32823592_89536569.pdf EDN: YWLSMP
3. Карпущенко Н.И., Быстров А.В. Основы построения участковой системы текущего содержания пути // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 4. С. 164–177. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_30775322_62202584.pdf EDN: ZXLWGH

4. Силкина Г.Ю., Кутузов А.Л., Шевченко С.Ю. Информационный базис Индустрии 4.0 // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 12(126). С. 222–224. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48095327_91882150.pdf EDN: UEPDAW
5. Дыкман Е.С. Процессный подход как решающий фактор при цифровой трансформации предприятия // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. 2019. № 1 (21). С. 37–44. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38201676_75994546.pdf EDN: ZXDKPU
6. Рубежанский П.Н. Поведенческий метод в организации управления результативностью производства эффективностью производства // Транспорт Урала. 2016. № 1(48). С. 31–34. EDN: VRDJSV, doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-31-34
7. Замышляев А.М. Предпосылки для создания цифровой системы управления безопасностью движения // Надежность. 2019. Т. 19. № 4 (71). С. 45–52. EDN: IRFPLE, doi: 10.21683/1729-2646-2019-19-4-45-52
8. Люлякина Д.Н. Оптимизация системы менеджмента предприятия: процессный подход // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2017. № 10 (73). С. 12. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: <https://ekonomika.snauka.ru/2017/10/15322> EDN: ZRENXH
9. Рубченко Д.С. Новый подход к планированию и формированию текущих затрат на ремонт объектов инфраструктуры на основе нормативного метода // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2016. Т. 75. № 1. С. 60–64. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_25509334_55522897.pdf EDN: VMFTAH
10. Ларина Т.П., Коржакова А.Н. Перспективы применения информационной системы в путевом хозяйстве // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (60). С. 42–47. Дата обращения: 28.11.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_53765880_99810159.pdf EDN: LNPCKZK
11. Земерова А.А. Методика создания цифровых проектов для реконструкции и ремонта железнодорожных путей // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 1. С. 130–136. EDN: LLQVEW doi: 10.33764/2618-981X-2021-1-130-136

REFERENCES

1. Vinokurtseva VA. application of the local track maintenance system in the track management of railway transport: regional aspect. *Issues of economics and management*. 2019;3(19):33–37. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: <https://moluch.ru/th/5/archive/126/4146> EDN: WAXGAD
2. Davydov AV. Organizational foundations of human resource management in railway transport. In: *Economics, innovation and scientific research in the transport complex of the region: problems and development prospects. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Khabarovsk, October 27–28, 2017*. Khabarovsk: DVGUPS; 2017:62–69.

- (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: [https:// elibrary.ru/download/elibrary_32823592_89536569.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_32823592_89536569.pdf) EDN: YWLSMP
3. Karpuschenko NI, Bystrov AV. Fundamentals of constructing a local track maintenance system. *World of Transport*. 2017;15(4):164–177. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_30775322_62202584.pdf EDN: ZXLWGH
 4. Silkina GYu, Kutuzov AL, Shevchenko SYu. Information basis of Industry 4.0. *Science and business: ways of development*. 2021;12(126):222–224. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48095327_91882150.pdf EDN: UEPDAW
 5. Dykman ES. Process approach as a decisive factor in the digital transformation of an enterprise. *Current problems of economics and management*. 2019;1(21):37–44. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38201676> EDN: ZXDKPU
 6. Rubezhansky PN. Behavioral method in organizing production efficiency management. *Transport of the Urals*. 2016;1(48):31–34. (In Russ.) EDN: VRDJSV, doi: 10.20291/1815-9400-2016-1-31-34
 7. Zamyshlyaev AM. prerequisites for creating a digital traffic safety management system. *Reliability*. 2019;19(4):45–52. (In Russ.) EDN: IRFPLE, doi: 10.21683/1729-2646-2019-19-4-45-52
 8. Lyulyakina DN. Optimization of the enterprise management system: a process approach. *Economics and management of innovative technologies*. 2017;10(73):12 (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: <https://ekonomika.snauka.ru/2017/10/15322> EDN: ZRENXH
 9. Rubchenko DS. A new approach to planning and forming current costs for the repair of infrastructure facilities based on the normative method. *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2016;75(1):60–64. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_25509334_55522897.pdf EDN: VMFTAH
 10. Larina TP, Korzhakova AN. Prospects for the use of information systems in track management. *Proceedings of the Rostov State University of Transport*. 2022;3(60):42–47. (In Russ.) [cited: 28.11.2023] Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53765880> EDN: LNPCKZK
 11. Zemerova AA. Methodology for creating digital projects for the reconstruction and repair of railway tracks. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021;1:130–136. (In Russ.) EDN: LLQVEW doi: 10.33764/2618-981X-2021-1-130-136

Сведения об авторах:**Быстров Антон Викторович**, аспирант;

eLibrary SPIN: 5711-5376; ORCID: 0009-0005-9510-6872;

E-mail: bystrovanton@ya.ru

Давыдов Анатолий Вячеславович, доктор экономических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Экономика транспорта»;

eLibrary SPIN: 8293-7323; ORCID: 0000-0002-2531-5629;

E-mail: davydov@stu.ru

Information about the authors:**Anton V. Bystrov**, graduate student;

eLibrary SPIN: 5711-5376; ORCID: 0009-0005-9510-6872;

E-mail: bystrovanton@ya.ru

Anatoly V. Davydov, Doctor of Sciences in Economics, Professor,

Head of the Department of Transport Economics;

eLibrary SPIN: 8293-7323; ORCID: 0000-0002-2531-5629;

E-mail: davydov@stu.ru

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.512 : 656.225.073.235
<https://doi.org/10.17816/transsyst627611>

© К.О. Винникова, Е.Н. Ефимова, А.В. Шмелев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта
(Москва, Россия)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ И ТАРИФИКАЦИЯ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Цель. Оценить влияние новых технических и технологических параметров железнодорожной перевозки контейнеров на себестоимость и разработать предложения по порядку тарификации контейнерных перевозок в современных условиях.

Материалы и методы. В связи с действующими условиями тарификации и для обеспечения равного уровня рентабельности перевозок контейнеров и контейнерных перевозок базовый уровень железнодорожного тарифа оценивался на основе сопоставления себестоимости на контейнерные и контейнерные перевозки с учетом фактора негабаритности перевозок контейнерных перевозок.

Результаты. В настоящей работе проведен анализ действующих и перспективных технологий перевозок контейнерных перевозок, с учетом влияния параметров подвижного состава и связанной с этим степени их негабаритности. В рамках данного анализа представлена классификация подвижного состава, используемого при контейнерных перевозках. Результаты оценки влияния технических параметров вагонов на степень негабаритности погруженных контейнерных перевозок и соответствия зонам и степеням негабаритности при контейнерных перевозках показали соблюдение принятого контейнерного габарита. В рамках данного габарита проведено сопоставление себестоимости перевозок контейнерных перевозок и контейнерных перевозок и выведены поправочные коэффициенты к тарифным схемам.

Заключение. По результатам выполненного исследования сделан вывод о целесообразности повышения базовый уровень железнодорожного тарифа при перевозках контейнерных перевозок для обеспечения равного уровня рентабельности перевозок с контейнерами.

Ключевые слова: контейнерные перевозки; платформы для КТК; себестоимость железнодорожных перевозок для целей тарифообразования; тариф на железнодорожную перевозку; технические и технологические параметры перевозки.

Как цитировать:

Винникова К.О., Ефимова Е.Н., Шмелев А.В. Определение себестоимости и тарификация контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте в современных условиях // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 142–157. <https://doi.org/10.17816/transsyst627611>

Section 4. TRANSPORT ECONOMICS

© K.O. Vinnikova, E.N. Efimova, A.V. Shmelev

Railway Research Institute

(Moscow, Russia)

DETERMINATION OF PRODUCTION COST AND TARIFFICATION OF CONTRAILER TRANSPORTATION ON RAILWAY TRANSPORT IN MODERN CONDITIONS

Aim. This study aims to estimate the influence of new technical and technological parameters of contrailer railway transportation on the production cost and develop proposals for contrailer transportation tariffication in modern conditions.

Materials and methods. Based on the current tariffication conditions and to ensure an equal level of container and contrailer transportation profitability, the base level of railway tariff was estimated by comparing the container and contrailer transportation costs in terms of the oversized nature of contrailer transportation.

Results. This study analyzes the current and prospective technologies of contrailer transportation considering the influence of rolling stock parameters and the related degree of their oversize. Furthermore, the analysis includes the classification of rolling stock used in contrailer transportation. Results of wagon technical parameter evaluation influence on the degree of oversized contrailers and their compliance with zones and degrees showed adherence to the adopted contrailer dimension. Under this dimension, the costs of container and contrailer transportation were compared and correction factors to tariff schemes were obtained.

Conclusion. Based on the results of this study, it would be reasonable to increase the base level of railway tariff for transportation of contrailers to ensure an equal level of transportation profitability with containers.

Keywords: container transportation; platforms for containerized cargo; railway transportation cost for tariff formation purposes; railway transportation tariff, technical and technological parameters of transportation.

To cite this article:

Vinnikova KO, Efimova EN, Shmelev AV. Determination of production cost and tariffication of contrailer transportation on railway transport in modern conditions. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(1):142–157. <https://doi.org/10.17816/transsy627611>

ВВЕДЕНИЕ

В транспортной стратегии Российской Федерации отмечена необходимость внедрения и развития на российских железных дорогах контейнерных перевозок [1]. При этом можно отметить, что контейнерные перевозки рассматриваются в основном не как конкурентный вид перевозок с автомобильным транспортом за новые объемы перевозок (например, как контейнерные), а как взаимовыгодное сотрудничество.

ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕСМОТРА ТАРИФНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

На российских железных дорогах решение об организации контейнерных перевозок в международном сообщении было принято на заседании НТС ОАО «РЖД» в 2010 году. При этом последняя научная оценка себестоимости железнодорожной перевозки контейнеров проводилась более 10 лет назад. За этот период произошел ряд изменений в технологическом аспекте этих перевозок. АО «ВНИИЖТ» совместно со специалистами ОАО «РЖД» были разработаны документы, определяющие некоторые особенности данных перевозок на железнодорожном транспорте, а именно Приказом Минтранса России от 26 июля 2017 г. № 278 «Об утверждении Технических условий размещения и крепления автомобилей, автопоездов, автоприцепов, полуприцепов, съемных автомобильных кузовов в порожнем или груженом состоянии при перевозке в грузовых вагонах» (далее – Приказ Минтранса № 278) [2] было введено понятие «контейнерный габарит»; распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2022 г. № 1258/р введен «Порядок взаимодействия работников территориального центра фирменного транспортного обслуживания, дирекции управления движением и грузоотправителей, организаторов контейнерных поездов при организации регулярных контейнерных перевозок в составе контейнерных поездов, поездов в рамках услуги «грузовой экспресс», технических маршрутов» (далее – Порядок № 1258/р) [3], в соответствии с которым организованы регулярные контейнерные перевозки в составе контейнерных поездов. Помимо этого, в целях организации комплексной работы по развитию сервиса контейнерных перевозок 24 декабря 2021 г. заместителем генерального директора ОАО «РЖД» А.Н. Шилов был утвержден План мероприятий по развитию сервиса контейнерных перевозок. В нем предусмотрены мероприятия по доработке технического и технологического обеспечения контейнерных перевозок, включая

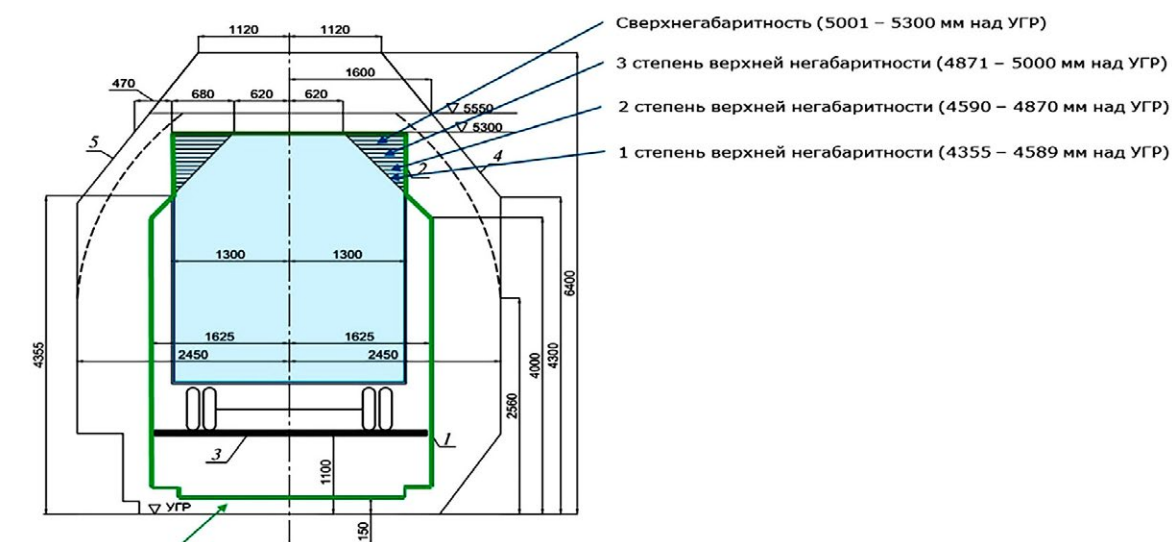
перспективную оценку грузовой базы для расширения маршрутов контейнерных перевозок.

Таким образом, в настоящее время остро встал вопрос оценки себестоимости контейнерных перевозок в новых технологических условиях работы и проведение обоснованной оценки действующих для контейнерных перевозок тарифов.

УСЛОВИЯ ПРОПУСКА КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ГРУЗОВ ПО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТАРИФИКАЦИЮ ЭТИХ ПЕРЕВОЗОК

Важнейшим фактором, определяющим условия пропуска контейнерных перевозок, являются габаритные размеры подвижного состава в груженом состоянии с контейнером (см. рис. 1). Введение в 2017 г. «контейнерного габарита» позволило изменить технологию перевозок контейнеров, что является стимулирующим фактором для развития данного вида перевозок.

В интервале высот до 4355 мм от уровня верха головок рельсов контейнерный габарит погрузки совпадает с очертанием основного



«Контейнерный габарит» в соответствии с Приказом Минтранс России от 26 июля 2017 № 278

1 - действующий габарит погрузки; 2 - верхнее очертание кузова прицепа; 3 - рама платформы; 4 - габарит приближения строений С; 5 - габарит приближения строений 1-С.

Рис. 1. Соотношение между габаритом контейнера и действующими габаритами погрузки и приближения строений

Fig. 1. Correlation between the dimension of the container and the applicable loading and approach dimensions of the structures

габарита погрузки на железнодорожном транспорте, а на высоте от 4355 мм контрейлерный габарит выходит за основной габарит погрузки и попадает в различные степени верхней негабаритности.

Если поставить контрейлер на универсальный вагон-платформу стандартного типа, то верхний уровень габарита погрузки выйдет на 210 мм за пределы «контрейлерного габарита». В связи с чем, для перевозки контрейлеров используются специализированные вагоны, соответствующие контрейлерному габариту в груженом состоянии.

В настоящее время на железных дорогах РФ существуют следующие виды специализированных вагонов, удовлетворяющих условиям погрузки в пределах контрейлерного габарита:

- универсальные вагоны-платформы с пониженным до 1100–1133 мм уровнем пола для перевозки контрейлеров и крупнотоннажных контейнеров;
- специализированные вагоны колодцевого типа для перевозки контрейлеров и крупнотоннажных контейнеров;
- специализированные вагоны с поворотной грузовой площадкой для перевозки автопоездов и другой самоходной автотехники.

Классификация и структура железнодорожного подвижного состава, используемого при контрейлерных перевозках по степеням негабаритности погруженных контрейлеров, представлена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация железнодорожного подвижного состава, используемого при контрейлерных перевозках по степеням негабаритности погруженных контрейлеров

Fig. 2. Classification of rolling stock used in container transportation by degrees of oversize of loaded containers

В настоящее время парк автотранспорта, подходящий под критерии местных технических условий для перевозки контрейлеров, имеет огромное многообразие. Условно все контрейлеры можно разделить на 4 типа транспортных средств в зависимости от их размера, массы, объема кузова и грузоподъемности (см. табл. 1.)

Необходимо отметить, что более 90% всех перевозок контрейлеров составляют перевозки полуприцепов. До 2018 года условия осуществления контрейлерных перевозок на железных дорогах колеи 1520 мм всех стран регламентировались Инструкцией по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов (далее – Инструкция ДЧ-1835) [4].

Таблица 1. Классификация контрейлеров по типам

Table 1. Contrailer classification by types

Тип транспортного средства, длина, м	Вес нетто транспортного средства в порожнем состоянии, т	Объем кузова, куб.м	Грузоподъемность, т	Средний вес брутто транспортного средства, т
Прицеп и съемный автомобильный кузов длиной до 7,8 м включительно	3,8–5	30–40	5–6	8,25
Прицеп и съемный автомобильный кузов длиной свыше 7,8 м	5,3–6	43–50	15–16	16,5
Полуприцеп вне зависимости от размера	6–7	80–96	28–30	26,8
Автопоезд (тягач с полуприцепом)	12–14	80–96	28–30	33,3

Особые условия Инструкции ДЧ-1835 включали проведение процедур организации перевозки негабаритных грузов, приведенных на рис. 3.

Тарификация контрейлерной перевозки в этом случае осуществлялась в соответствии с п.2.15 Прейскуранта № 10-01 «Определение платы за перевозку грузов на сцепках платформ, транспортерах и негабаритных грузов» [5]. Тариф в этих условиях превышал действующий в 5–50 раз, что определялось степенью негабаритности перевозки.

Проведенные специалистами АО «ВНИИЖТ» опытные перевозки в 2017 г. показали, что особые условия для разовых поездок контрейлеров являются избыточными при организации регулярных контрейлерных

перевозок [6–8]. Анализ технологии перевозок в пределе «контрейлерного габарита» показал сокращение требуемых организационных мероприятий и технологических операций.

В связи с вводом приказа Минтранса № 278 были разработаны дополнительные документы, определяющие правила перевозки контрейлеров. В настоящее время в ОАО «РЖД» действуют документы, регламентирующие осуществление контрейлерных перевозок по железным дорогам [2, 3, 9]. В соответствии с данными документами пропуск поездов с контрейлерными грузами может производиться без применения контрольной рамы и сопровождения представителями службы пути и других служб при следующих условиях:

- соответствия погруженных контрейлеров 1-й и 2-й степени негабаритности в составе любых грузовых поездов без дополнительных мероприятий;
- соответствия погруженных контрейлеров 3-й степени негабаритности и сверхнегабаритности в пределах контрейлерного габарита погрузки по, определенным в [9], маршрутам, с дополнительными

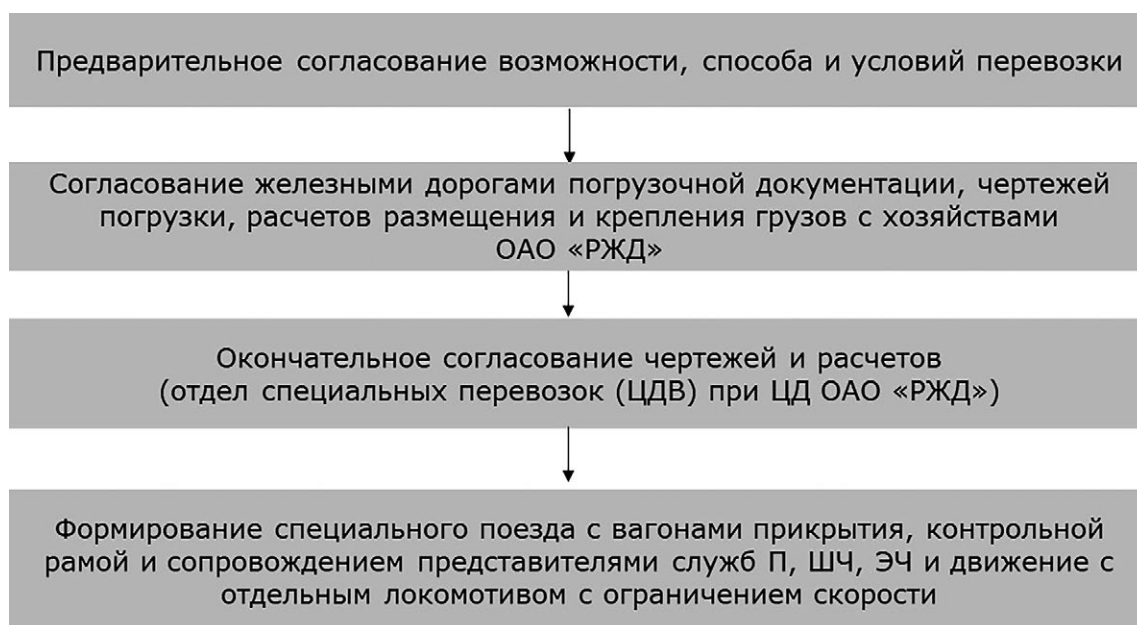


Рис. 3. Мероприятия, выполняемые при перевозках контрейлеров в зависимости от степени негабаритности в соответствии с инструкцией ДЧ-1835 (до введения контрейлерного габарита)

Fig. 3. Activities to be carried out during the transportation of contrailers depending on the degree of oversize in accordance with the Instructions for transportation of oversized and heavy cargoes (ДЧ-1835) (before the introduction of the contrailer dimension)

технологическими условиями, а именно: запрет на роспуск вагонов с сортировочной горки в процессе маневровой работы и проведение комиссионной проверки размещения и крепления негабаритного груза перед отправкой.

Основными видами перевозки контрейлеров в настоящее время являются перевозки на платформах колodцевого типа в стандартном габарите из европейской части России в Уссурийск и перевозки со сверхнегабаритной степенью загрузки по Северной дороге, которые имеют социальное значение для жителей прилегающих регионов. Это связано с обледенением в зимнее время года автомобильных дорог и отсутствием альтернативных вариантов доставки грузов.

Специальной схемы тарификации в Прейскуранте № 10-01 для контрейлеров не разрабатывалось. В соответствии с действующим п. 2.14 Прейскуранта № 10-01 плата за перевозку контрейлерных грузов определяется по второму тарифному классу в зависимости от типа и длины контрейлера.

В соответствии с данным пунктом Прейскуранта № 10-01 прицеп и съемный автомобильный кузов длиной до 7,8 м включительно тарифицируется по тарифной схеме № 93, применяемой для тарификации 20-футовых контейнеров, а полуприцеп, прицеп и съемный автомобильный кузов длиной свыше 7,8 м — по тарифной схеме № 94 для 40-футовых контейнеров. Порожние контрейлеры тарифицируются аналогично порожним контейнерам с применением коэффициента 0,6.

СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ И КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

В работе АО «ВНИИЖТ» была проведена сравнительная оценка себестоимости контрейлеров в сравнении с контейнерами. Для целей сопоставления полных затрат в указанных видах перевозок была выбрана параметрическая модель определения себестоимости грузовых перевозок [10–16], основанная на выделении затрат на перевозки на инфраструктурную и локомотивную составляющие за повагонную отправку по следующей формуле:

$$C = e_{нко} + (e_{ваг-км} + e_{ткм} \cdot q_{бр}^{ваг}) \cdot L_{км} \cdot k_{рас}, \quad (1)$$

где $e_{нко}$ — расходная ставка за начально-конечные операции, руб.; $e_{ваг-км}$ — расходная ставка за вагоно-километры, руб/ваг-км; $e_{ткм}$ — расходная

ставка за тонно-километры, руб/ткм; $\frac{ваг}{бр}$ – вес брутто вагона, т; $L_{км}$ – тарифное расстояние перевозки, км; $k_{рас}$ — коэффициент, учитывающий различия тарифного и фактического расстояния перевозки.

Определяющими параметрами рассматриваемой модели являются: вес брутто вагона, длина погрузочного места и расстояние перевозки. Однако, при оценке себестоимости железнодорожной перевозки контрейлеров были учтены следующие дополнительные параметры:

- меньшая степень использования длины погрузочного места при размещении контрейлера в вагоне и дифференцированная длина вагона;
- вероятность отклонения расстояния перевозки от кратчайшего тарифного в связи с негабаритностью;
- затраты, связанные с комиссионной проверкой размещения и крепления негабаритного груза;
- изменение технологии маневровой работы, связанной с негабаритностью.

В этом случае формула себестоимости контрейлерной перевозки повагонной отправкой принимает вид (2):

$$C_{кон}^{негаб} = \frac{e_{нко} + e_{ком}}{k} + \frac{(e_{ваг-км} + e_{вкм}^{ман} + e_{ткм} \cdot q_{бр}^{ваг}) \cdot L_{км} \cdot k_{рас}}{k}, \quad (2)$$

где $e_{ком}$ – расходная ставка за осуществление комиссионной проверки размещения и крепления негабаритного груза (контрейлера), руб.; k – количество единиц контрейлеров, расположенных на одной платформе, шт.; $e_{вкм}^{ман}$ – расходная ставка, учитывающая дополнительные расходы на маневровую работу.

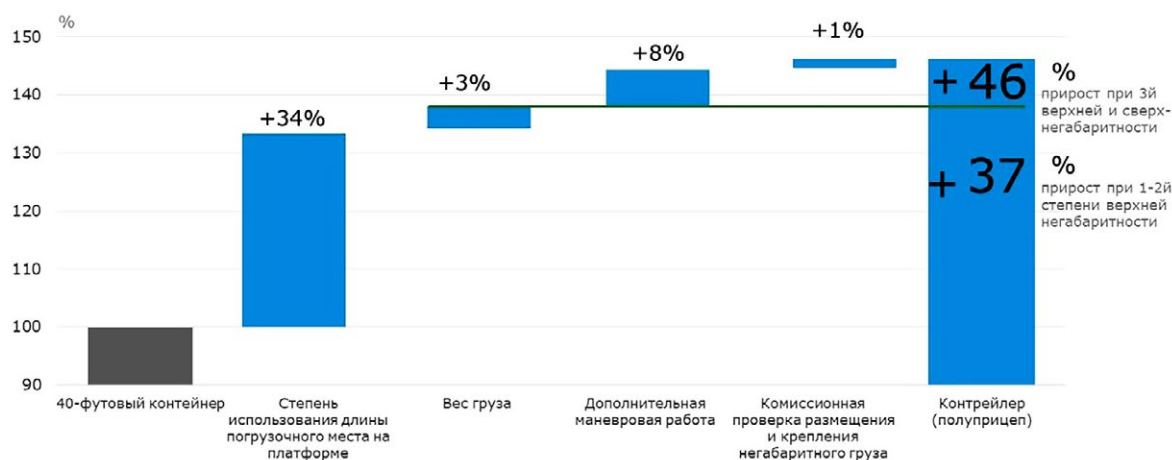
В результате проведенной оценки были выявлены существенные различия в уровне себестоимости перевозок контрейлеров и контейнеров. Полученные коэффициенты сопоставления этих величин представлены в табл. 2.

Следует отметить, что ни в одной из действующих схем тарификации себестоимость контрейлеров не равна себестоимости контейнеров, а себестоимость перевозки полуприцепов превышает ее на 40–50%.

На рис. 4 обозначены основные факторы, определившие более высокий уровень себестоимости контрейлерных перевозок по отношению к себестоимости контейнерных перевозок (на примере перевозки полуприцепов). Основными факторами, оказавшими влияние на увеличение себестоимости перевозки, является степень использования

Таблица 2. Результаты расчета сравнительной оценки себестоимости перевозок контрейлеров и контейнеров**Table 2.** Calculation results of comparative valuation for production cost of contrailer and container transportation

Тип транспортного средства, длина, м	Коэффициент к тарифной схеме			
	Контрейлер в грузном состоянии		Контрейлер в порожнем состоянии	
	При габарите 1-Т, 1-2-я степень верхней негабаритности	3-я степень верхней негабаритности, сверхнегабаритности	При габарите 1-Т, 1-2-я степень верхней негабаритности	3-я степень верхней негабаритности, сверхнегабаритности
Прицеп и съемный автомобильный кузов длиной до 7,8 м включительно	1,03 х тарифная схема №93	1,10 х тарифная схема №93	1,01 х тарифная схема № 93	1,08 х тарифная схема № 93
Прицеп и съемный автомобильный кузов длиной свыше 7,8 м	1,32 х тарифная схема № 94	1,41 х тарифная схема № 94	1,28 х тарифная схема № 94	1,37 х тарифная схема № 94
Полуприцеп вне зависимости от размера	1,37 х тарифная схема № 94	1,46 х тарифная схема № 94	1,29 х тарифная схема № 94	1,37 х тарифная схема № 94
Автопоезд	1,41 х тарифная схема № 94	1,49 х тарифная схема № 94	1,32 х тарифная схема № 94	1,41 х тарифная схема № 94

**Рис. 4.** Разница себестоимости железнодорожной перевозки 40-футового контейнера и контрейлера (полуприцепа)**Fig. 4.** Difference between the cost of rail transportation of a 40-foot container and a contrailer (trailer-truck)

длины погрузочного места на платформе и длина вагона. Это связано прежде всего с тем, что один полуприцеп полностью занимает всю платформу длиной 19,6 м. В то же время 40-футовый контейнер перевозится в комплекте 2-х штук на платформе, длиной 25,3 м.

Другие факторы, оказавшие влияние на увеличение себестоимости перевозки контрейлеров при 3-й степени верхней негабаритности и сверхнегабаритности, связаны с затратами на маневровую работу и проведением комиссионной проверки размещения и крепления негабаритного груза перед отправкой.

Другие факторы, оказавшие влияние на увеличение себестоимости перевозки контрейлеров при 3-й степени верхней негабаритности и сверхнегабаритности, связаны с затратами на маневровую работу и проведением комиссионной проверки размещения и крепления негабаритного груза перед отправкой.

Другие факторы, оказавшие влияние на увеличение себестоимости перевозки контрейлеров при 3-й степени верхней негабаритности и сверхнегабаритности, связаны с затратами на маневровую работу и проведением комиссионной проверки размещения и крепления негабаритного груза перед отправкой.

Представленные в табл. 2 повышающие коэффициенты к тарифным схемам могут лечь в основу тарификации контрейлерных перевозок в рамках корректировки действующего Прейскуранта № 10-01.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для обеспечения равного уровня рентабельности перевозок контейнеров и контрейлеров базовый уровень железнодорожного тарифа целесообразно принять в соответствии с разработанной системой повышающих коэффициентов. В то же время, применение фиксированного прейскурантного тарифа, например, на уровне, близком к оценке полной себестоимости перевозки контрейлера, в ряде случаев делает экономически невыгодными для автоперевозчиков (грузоотправителей или грузополучателей) перевозки с участием железнодорожного транспорта.

В этом случае можно предложить применять гибкое ценообразование на контрейлерные перевозки на основе договорных тарифов на каждую перевозку исходя из баланса интересов автомобильных компаний и железнодорожного транспорта. Минимальным уровнем договорного железнодорожного тарифа в этом случае можно было бы использовать

тариф, обеспечивающий безубыточность перевозки, т.е. компенсацию не полных, а дополнительно возникающих производственных расходов железнодорожного транспорта.

Расчеты показывают, что суммарные издержки автомобильного и железнодорожного транспорта на перевозку груза при контрейлерном варианте его доставки, как правило, превышают стоимость перевозки, осуществляемой без размещения автомобильного подвижного состава на железнодорожных вагонах (платформах). Поэтому оптимальным вариантом развития таких перевозок представляется их дотирование государством, как, например, это реализовано в ряде европейских стран.

Кроме того, результаты данной экономической разработки высветили ряд задач технологического характера, решение которых могло бы стимулировать развитие контрейлерных перевозок, в частности, разработка новых видов подвижного состава, позволяющего обеспечить эффективное использование длины погрузочного места в вагоне при размещении контрейлеров.

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. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 3363-р от 27 ноября 2021 г. М.: Правительство РФ, 2021. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf>
2. Приказ Минтранса России № 278 от 26 июля 2017 г. «Об утверждении Технических условий размещения и крепления автомобилей, автопоездов, автоприцепов, полуприцепов, съемных автомобильных кузовов в порожнем или груженом состоянии при перевозке в грузовых вагонах». М.: Минюст РФ, 2017. Дата обращения: 22.02.2024. Доступно по: <https://minjust.consultant.ru/documents/37447?ysclid=lssxro1bc0101328723>
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12 мая 2022 № 1258/р «Об утверждении Порядка взаимодействия работников территориального центра фирменного транспортного обслуживания, дирекции управления движением и грузоотправителей, организаторов контейнерных поездов при организации

- регулярных контрейлерных перевозок в составе контейнерных поездов, поездов в рамках услуги «грузовой экспресс», технических маршрутов» (Вместе с Порядком). М: ОАО «РЖД», 2022. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-04.07.2017-N-1258r/>
4. Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах государств-участников СНГ, латвийской республики, литовской республики, эстонской республики ДЧ-1835, утв. на 30-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников СНГ 19.10.2001 г. (с изменениями, утвержденными на 38-м, 44-м заседаниях Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества 9–10 июня 2004 г.). Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <https://sgv4.ittm.lv/editor/files/OversizeChapter1.pdf>
 5. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами. Тарифное руководство № 1: утв. Постановлением Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации № 47-т/5 от 17 июня 2003 г. // Российская газета. 2013. 24 июля. № 160. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43726/9184285ffbf644a7e84c3babfde0a165258fdaf8/?ysclid=lssymnie1432771736
 6. Лазаренко Ю.М., Аршинцев Д.Н., Заветрталюк А.В. и др. Контрейлерный габарит погрузки, проблемы и процесс внедрения // Вестник ВНИИЖТ. 2017. № 1. С.31–37. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/viewFile/129/130> EDN: YHPSVJ
 7. Писаревский Г.Е., Ломакина Н.М. Развитие контрейлерных перевозок на «пространстве 1520» – важнейшее направление сокращения логистических издержек // Бюллетень ОСЖД. 2014. № 4–5. С. 17–24. EDN: TIFFUR
 8. Лазаренко Ю.М., Аршинцев Д.Н., Писаревский Г.Е., Волькович Ю.Н., Капускина Е.В. Экономическая эффективность внедрения увеличенных габаритов подвижного состава // Экономика железных дорог. 2019. № 11. С. 52–58. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_41320948_70993020.pdf EDN: LVEWDU
 9. Распоряжение ОАО «РЖД» № 2497/р от 27 ноября 2018 (ред. от 18 августа 2022 г.) «Об утверждении Порядка проверки готовности маршрутов к пропуску контрейлерных поездов и условий их пропуска» (Вместе с Порядком). М: ОАО «РЖД», 2022. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: https://e-ecolog.ru/docs/IIKt1720j_o-28jKXQkKx
 10. Ефимова Е.Н., Маневич П.Б., Шмелев А.В. Современная методология разработки параметрических моделей определения себестоимости перевозок грузов для целей тарифообразования // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 4. С. 205–210. EDN: XWOSVN doi: 10.21780/2223-9731-2018-77-4-205-210
 11. Абрамов А.П. Затраты железных дорог и цена перевозки. М.: Транспорт, 1974.
 12. Крейнин А.В. Развитие системы железнодорожных грузовых тарифов и их регулирование в России (1837–2007 гг.). М.: Изд. дом Международного ун-та в Москве, 2010. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <https://nashol>

- me/20220726146049/razvitie-sistemi-jezнодорожных-gruzovih-tarifov-i-ih-regulirovanie-v-rossii-kreinin-a-v-2004.html?ysclid=lsubuksrgi927058352
13. Смехова Н.Г., Купоров А.И. Себестоимость железнодорожных перевозок. М.: Маршрут, 2003. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: http://static.scbist.com/scb/uploaded/smehova_sebestoim.pdf?ysclid=lsuc6floc3479583718
 14. Мазо Л.А., Маневич П.Б. Критерии построения инфраструктурного тарифа в условиях появления независимых перевозчиков грузов // Тарифы и инвестиции. 2016. № 1. С. 26–32. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: <https://cloud.mail.ru/public/x1Z7/Z9s7GvupN>
 15. Мазо Л.А. О грузовых тарифах // Отечественные записки. 2013. № 3. С. 162–174. Дата обращения: 22.02.2024. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_21218770_31100289.pdf EDN: RWIPDJ
 16. Мазо Л.А. Современные методы управления экономическими процессами на железнодорожном транспорте. М.: МЭИ, 2001.

REFERENCES

1. Transport Strategy of the Russian Federation up to 2030 with a forecast for the period up to 2035, approved by the order of the Government of the Russian Federation № 3363-r of November 27, 2021. Moscow: Government of the Russian Federation, 2021. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOOpQhLlOnUT91RjCbeR.pdf>
2. Order of the Ministry of Transport of Russia No. 278 of July 26, 2017. «On Approval of the Technical Conditions for placement and fastening of cars, road trains, trailers, semi-trailers, removable car bodies in empty or loaded condition during transportation in freight cars», registered in the Ministry of Justice of Russia No. 48975 on 22.11.2017. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <https://minjust.consultant.ru/documents/37447?ysclid=lssxro1bc0101328723>
3. Russian Railways Order No. 1258/r dated May 12, 2022 «On Approval of the Procedure for Interaction between Employees of the Territorial Centre of Corporate Transport Service, Traffic Management Directorate and consignors, organizers of container trains when organizing regular contrailer transportation in container trains, trains as part of the «freight express» service, and technical routes» (Together with the Procedure). Moscow: JSC «RZHD», 2022. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <https://rulings.ru/acts/Rasporyazhenie-OAO-RZHD-ot-04.07.2017-N-1258r/>
4. Instruction on transportation of oversized and heavy-weight cargoes on the railways of the CIS member-states, the Republic of Latvia, the Republic of Lithuania, the Republic of Estonia DCH-1835, approved at the 30th meeting of the Council on Railway Transport of the CIS member-states on 19.10.2001 (with amendments approved at the 38th, 44th meetings of the Council on Railway Transport of the CIS member-states on June 9–10, 2004). (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <https://sgv4.ittm.lv/editor/files/OversizeChapter1.pdf>
5. Price List No. 10-01. Tariffs for freight transportation and infrastructure services performed by Russian railways. Tariff Guide No. 1: approved by Resolution of the Federal Energy Commission of the Russian Federation No. 47-t/5 of June 17,

2003. *Rossiyskaya Gazeta*. 2013; July 24 (160). (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43726/9184285ffbf644a7e84c3babfde0a165258fdaf8/?ysclid=lssymnie1432771736
6. Lazarenko YM, Arshintsev DN, Zavettalyuk AV, et al. Contrailer loading gauge, problems and implementation process. *Vestnik VNIIZhT*. 2017;1:31–37. (In Russ.)). [cited: 22.02.2024] Available from: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/viewFile/129/130>
 7. Pisarevskiy GE, Lomakina NM. Development of contrailer transportation on the «1520 space» – the most important direction of reduction of logistics costs. *OSJD Bulletin*. 2014; 4–5:17–24. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: https://elibrary.ru/item.asp?id=22949375&ysclid=lsszm_532h0888239528EDN: TIFFUR
 8. Lazarenko YuM, Arshintsev DN, Pisarevsky GE, Volkovich YN, Kapuskina EV. Economic efficiency of the introduction of increased dimensions of rolling stock. *Railroad Economics*. 2019; 11:52–58. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41320948&ysclid=lssznyov6r667688866>
 9. Russian Railways Order No. 2497/r of November 27, 2018 (ed. as of August 18, 2022) «On Approval of the Procedure for Checking the Readiness of Routes to Pass Contrailer Trains and the Conditions for their Passing» (Together with the Procedure). Moscow: JSC «RZHD»; 2022. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: https://e-ecolog.ru/docs/IlKt1720j_o-28jKXQkKx
 10. Efimova EN, Manevich PB, Shmelev AV. Modern methodology for the development of parametric models for determining the cost of freight transportation for tariff setting purposes. *Vestnik VNIIZhT*. 2018;4:205–210. (In Russ.) EDN: XWOSVN doi: 10.21780/2223-9731-2018-77-4-205-210
 11. Abramov AP. Costs of railroads and the price of transportation. Moscow: Transport; 1974. 256 p. (In Russ.).
 12. Kreinin AV. Development of the system of railway freight tariffs and their regulation in Russia (1837–2007). Moscow: Publishing House of the International University in Moscow, 2010. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: <https://nashol.me/20220726146049/razvitie-sistemi-jeleznodorojnih-gruzovih-tarifov-i-ih-regulirovanie-v-rossii-kreinin-a-v-2004.html?ysclid=lsubuksrgi927058352>
 13. Smekhova NG, Kuporov AI. The cost price of railway transportation. Moscow: Marshrut, 2003. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: http://static.scbist.com/scb/uploaded/smekhova_sebestoim.pdf?ysclid=lsuc6floc3479583718
 14. Mazo LA, Manevich PB. Criteria for building an infrastructure tariff in the conditions of the emergence of independent freight carriers. *Tariffs and Investments*. 2016;1:26–32. (In Russ.). [cited: 22.02.2024] Available from: <https://cloud.mail.ru/public/x1Z7/Z9s7GvupN>
 15. Mazo LA. About cargo tariffs. *Otechestvennye zapiski*. 2013;3:162–174. (In Russ.) [cited: 22.02.2024] Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_21218770_31100289.pdf EDN: RWIPDJ
 16. Mazo LA. Modern methods of economic processes management on the railway transportation. Moscow: MEI; 2001. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Винникова Ксения Олеговна, канд. экон. наук, директор научного центра

«Экономика комплексных проектов и тарифообразование»;

eLibrary SPIN: 6673-7228; ORCID: 0000-0002-0172-4647;

E-mail: vinnikova.ksenia@vniizht.ru

Ефимова Елена Николаевна, канд. экон. наук, научный консультант;

eLibrary SPIN: 7176-0100; ORCID: 0000-0002-2395-6185;

E-mail: efimova.elena@vniizht.ru

Шмелев Александр Владиславович, канд. экон. наук, научный консультант;

eLibrary SPIN: 3539-9660

Information about the authors:

Ksenia O. Vinnikova, Candidate of Sciences in Economics, Director of the scientific center "Economics of complex projects and tariff formation";

eLibrary SPIN: 6673-7228; ORCID: 0000-0002-0172-4647;

E-mail: vinnikova.ksenia@vniizht.ru

Elena N. Efimova, Candidate of Sciences in Economics, Scientific Advisor;

eLibrary SPIN: 7176-0100; ORCID: 0000-0002-2395-6185;

E-mail: efimova.elena@vniizht.ru

Alexander V. Shmelev, Candidate of Sciences in Economics, Scientific Advisor;

eLibrary SPIN: 3539-9660