

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN
TRANSPORTATION
SYSTEMS AND
TECHNOLOGIES
peer-review journal

transsyst.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

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

«ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

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

ИНДЕКСАЦИЯ

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

КОНТАКТЫ

Адрес: 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 115, ауд. 9/11-5
E-mail: transsyst@mail.ru
WEB: www.transsyst.ru
Телефон: +7 (911) 2384445

Научный редактор В.В. Никитин, доктор технических наук, профессор
Перевод на английский язык А.Ю. Гнатенко
Редактор сайта М.Д. Боярский
Ответственный редактор О.Ю. Смирнова
Верстка Т.С. Антонова

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 "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 рукописи, а также все сопроводительные и дополнительные файлы следует направить в редакцию через личный кабинет на сайте журнала по URL: <http://trassyst.ru/> Рукопись и дополнительные материалы следует оформить в соответствии с правилами редакции, см. подробно по <https://trassyst.ru/transsyst/about/submissions>

ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Том 8, № 4

2022

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

Панычев Александр Юрьевич
к.э.н., доцент, ректор ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Титова Тамила Семёновна
д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Первый проректор – Проректор по науке 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;
Верескун Владимир Дмитриевич, д.т.н., профессор, ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Журавлева Наталья Александровна, доктор экономических наук, профессор Заведующий кафедрой «Экономика транспорта», Директор Института прикладной экономики и бухгалтерского учета железнодорожного транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Клюшпис Йоханнес, доктор наук 2-й степени, полный профессор Деггендорфской высшей технической школы, Мюнхен, Германия;
Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д.т.н., профессор, президент РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия;
Кручинина Ирина Юрьевна, д.т.н., директор ИХС РАН, Санкт-Петербург, Россия;
Ли Вэйли, PhD, профессор Пекинского транспортного университета, Пекин, КНР;
Линь Гобинь, PhD, профессор, директор Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Ледяев Александр Петрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Тоннели и метрополитены», ведущий научный сотрудник Научно-аналитической группы по развитию городского транспорта ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Ма Чжисюнь, PhD, старший научный сотрудник Национального транспортно-инженерного центра Маглев, доцент Университета Тунцзи, Шанхай, КНР;
Мулюков Радик Рафикович, член-кор. РАН, д. физ.-мат.н., директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия;
Ни Фэй, PhD, младший научный сотрудник, Национальный транспортно-инженерный центр Маглев, Университет Тунцзи, Шанхай, КНР;
Никитенко Владимир Александрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика» РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Подсорин Виктор Александрович, д.э.н., профессор РУТ (МИИТ), Москва, Россия;
Повадол Сирирангси, Dr., Заместитель декана Факультета логистики и управления транспортом Паняпиватского института управления, Паккред, Таиланд;
Смирнов Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Мосты» ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия;
Смирнов Сергей Александрович, Руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок им. А.А. Зайцева 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 Хьён-Сук, PhD, начальник Департамента Маглев и линейных двигателей, старший научный сотрудник Корейского института машиностроения и материаловедения, Тэджон, Республика Корея.

FOUNDER AND PUBLISHER

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

"MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES"

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

INDEXING

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

CONTACTS

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

Science Editor V.V. Nikitin, Doctor of Technical Science, Professor
Translation into English A.Yu. Gnatenko
WEB- Editor M.D. Boyarsky
The Executive Editor O.Yu. Smirnova
Layout Editor T.S. Antonova

AIMS & SCOPE

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

JOURNAL CONTENT SELECTION

The journal selects material based on the double-blind peer-review conducted by members of the editorial board and external experts.

To be published, the manuscript and all accompanying files should be sent to the editorial team through a personal account on the journal's website at: <http://trassyst.ru/>

The manuscript and additional materials should be prepared and arranged in accordance with the author guidelines (see in detail at: <https://transsyst.ru/transsyst/about/submissions>)

MODERN TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY

Vol. 8, Issue 4

2022

PEER-REVIEWED RESEARCH JOURNAL**EDITOR-IN-CHIEF**

Aleksandr Y. Panychev

PhD, Associate professor, rector PGUPS, St. Petersburg, Russia

Deputy 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

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;

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

Sergey A. Smirnov, Head A.A. Zaitsev Scientific and educational center for the innovative development of passenger rail transport PGUPS, St. Petersburg, Russia;

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

Richard Magdalena 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;

Smirnov Sergey PGUPS, St. Petersburg, 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		TABLE OF CONTENTS
ОБЗОРЫ		REVIEWS
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения</p> <p>Васильев К.А., Аверченко Г.А.</p> <p>Экспериментальное исследование процесса перемешивания асфальтобетонных смесей</p>	5	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Bases and foundations, underground structures</p> <p>Vasilev K.A., Averchenko G.A.</p> <p>Experimental study of the mixing process of asphalt concrete mixtures</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения</p> <p>Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С.</p> <p>Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России</p>	14	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Bases and foundations, underground structures</p> <p>Alekseev S.V., Simonov D.L., Katikova A.S.</p> <p>The impact of natural factors on the condition of roads in various regions of Russia</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения</p> <p>Костенко В.В., Коробов Д.С.</p> <p>Технико-технологические особенности карьерных железных дорог</p>	31	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Bases and foundations, underground structures</p> <p>Kostenko V.V., Korobov D.S.</p> <p>Technical and technological features of quarry railways</p>
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ		ORIGINAL STUDIES
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Мартirosян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А., Стариковский А.С., Руднев И.А.</p> <p>Влияние условий охлаждения ВТСП сборок на характеристики движущейся магнитолевитационной системы</p>	46	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Martirosian I.V., Pokrovskii S.V., Osipov M.A., Starikovskii A.S., Rudnev I.A.</p> <p>Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving maglev system</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Больших И.В., Черняев С.С.</p> <p>Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей</p>	58	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Sirotkin V.V., Pigalev D.A., Bol'shikh I.V., Chernyaev S.S.</p> <p>Application of specialized software for calculation of magnetic field in the turns of switched reluctance motors stator windings</p>

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Незевак В.Л., Дмитриев А.Д.</p> <p>Имитационные модели и варианты применения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении</p>	74	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Nezevak V.L., Dmitriev A.D.</p> <p>Simulation models and application options of electric power storage systems in traction power supply</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Ким К.К., Карпова И.М.</p> <p>К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем</p>	91	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Kim K.K., Karpova I.M.</p> <p>On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems</p>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения</p> <p>Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Иванова Е.А., Шашко А.Е., Цырлин М.И.</p> <p>Моделирование контактной пары «колесо-рельс» экспериментальной конструкции гибкого рельса в легких линиях струнной транспортной системы uST</p>	107	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Bases and foundations, underground structures</p> <p>Unitsky A.E., Khlebus A.S., Ivanova E.A., Shashko A.E., Tsyrlin M.I.</p> <p>Simulation of the contact pair “wheel-rail” of the experimental design of the flexible rail in the lightweight tracks of the uST string transport system</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Чеченова Л.М.</p> <p>Обоснование решений в области цифровизации контейнерных сервисов Октябрьской железной дороги</p>	126	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Chechenova L.M.</p> <p>Substantiation of solutions in the field of digitalization of container services of the Oktyabrskaya railway</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Егоров Ю.В.</p> <p>Влияние показателей подвижного состава на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа (на примере полувагонов)</p>	140	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Egorov Y.V.</p> <p>The influence of rolling stock indicators on the car component of the freight railway tariff (by the example of gondel cars)</p>

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК 691.168

DOI DOI 10.17816/transsyst2022845-13

© **К.А. Васильев, Г.А. Аверченко**

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Рассматривается процесс перемешивания минеральных компонентов с органическими вяжущими в технологии приготовления горячих асфальтобетонных смесей. В качестве рабочей гипотезы принято предположение о функциональной зависимости между расходом мощности электродвигателя мешалки и сопротивлением перемешиванию. Необходимо установить зависимости расхода мощности привода мешалки от различных технологических параметров. Были проведены эксперименты: в лабораторных и производственных условиях, которые показали достаточно простые зависимости.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, органические вяжущие, перемешивание, вязкость смеси, свойства асфальтобетона.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© **K.A. Vasilev, G.A. Averchenko**

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

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MIXING PROCESS OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES

The process of mixing mineral components with organic binders in the technology of preparation of hot asphalt concrete mixtures is considered. As a working hypothesis, the assumption of a functional relationship between the power consumption of the electric motor of the agitator and the mixing resistance is accepted. It is necessary to establish the dependence of the power consumption of the agitator drive on various technological parameters. Experiments were carried out: in laboratory and production conditions, which showed fairly simple dependencies.

Key words: asphalt concrete mixture, organic binders, mixing, viscosity of the mixture, properties of asphalt concrete.

ВВЕДЕНИЕ

В технологии приготовления горячих асфальтобетонных смесей наиболее сложным и наименее изученным процессом является перемешивание минеральных компонентов с органическими вяжущими. Решение задачи усложняется тем, что при этом изменяются такие свойства среды, как вязкость и агрегатное состояние.

Изучению этого процесса посвящен ряд работ [1–4], в которых на основании изменения расхода мощности привода мешалки предлагается судить не только о достижении однородности смеси [5], но и об оценке качества асфальтобетонных смесей в процессе перемешивания компонентов, которое в конечном итоге определяет работоспособность асфальтобетонного покрытия.

Помимо диспергирования органического вяжущего, теплообмена и массопереноса в смесителе могут протекать процессы окислительной поликонденсации, существенно изменяющие реологические характеристики асфальтобетона. Последнее обстоятельство используется в технических решениях по приготовлению горячих асфальтобетонных смесей путем совмещения процессов окисления или доокисления вяжущего и перемешивания компонентов смеси в одной операции [6, 7].

ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Применение такой технологии для получения асфальтобетонных смесей обуславливает необходимость контроля за изменением консистенции вяжущего в процессе перемешивания. В качестве общей рабочей гипотезы принято предположение о функциональной зависимости между расходом мощности электродвигателя мешалки и сопротивлением перемешиванию, вызванным изменяющейся вязкостью смеси. Поэтому необходимо установить зависимости расхода мощности привода мешалки от различных технологических параметров (температуры смеси, времени перемешивания, инициатора процесса окисления и скорости ввода его в мешалку).

С этой целью в лабораторных и производственных условиях были проведены эксперименты. Для получения стабильных значений расходов мощности параметры технологического процесса приготовления горячих асфальтобетонных смесей выдерживались на строго заданных уровнях.

Принцип действия лабораторной установки, следующий: напряжение, пропорциональное мощности, потребляемой электродвигателем постоянного тока мешалки, поступало на фильтр нижних частот (ФНЧ), а с выхода ФНЧ напряжение подавалось на цифровой вольтметр В7-16 и шлейфовый осциллограф НО-431. Число

оборотов мешалки контролировалось с помощью электронного цифрового тахометра ТЦ-1.

Температура смеси в процессе перемешивания измерялась с помощью термопары «ХК» и регистрировалась на диаграммах потенциометра КСП-4 и шлейфового осциллографа НО-431.

Таким образом, на диаграммной ленте шлейфового осциллографа НО-431 одновременно записывались расход мощности электродвигателя мешалки и изменения температуры смеси. Применение двигателя постоянного тока П-12 и стабилизированных выпрямителей ТЗС-13, УИП-2 позволяло задавать идентичные начальные условия эксперимента. В связи с относительной неоднородностью перемешиваемой асфальтобетонной смеси нагрузка на двигатель, а следовательно, и потребляемая им мощность, в течение одного оборота вала мешалки изменяются несколько раз.

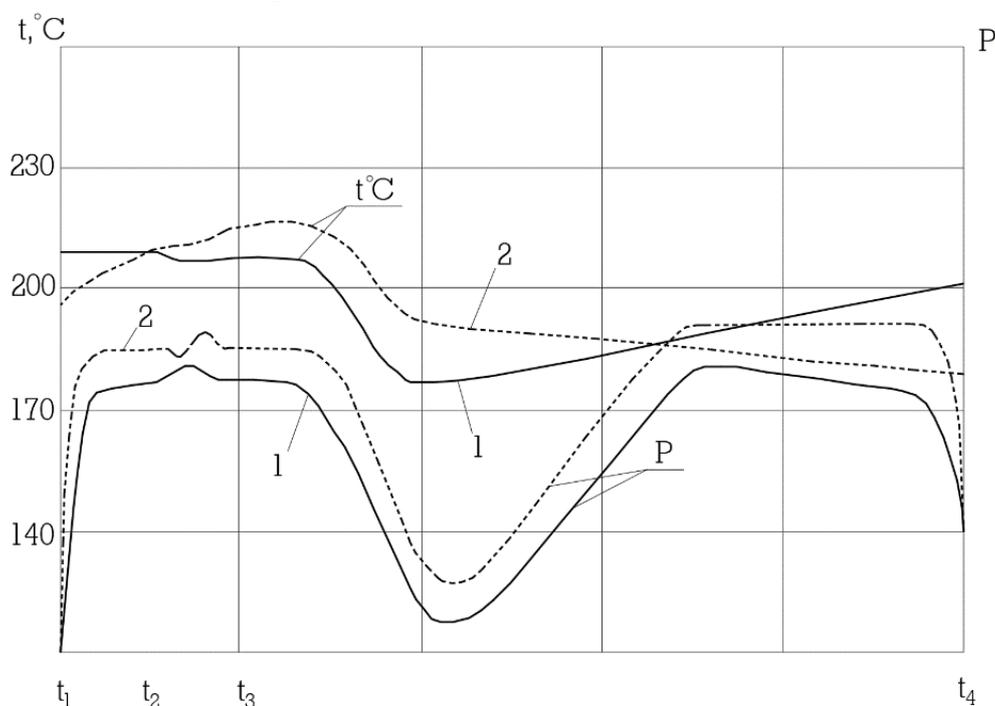


Рис. 1. Зависимость расхода мощности и температуры смеси от времени перемешивания:

- 1 – лабораторной мешалке;
- 2 – на смесителе Д-597;
- t_1 – начало введения минерального материала;
- t_2 – начало введения вяжущего;
- t_3 – начало введения инициатора окисления;
- t_4 – выгрузка смеси

Однако целью эксперимента было выявить изменения мощности, на один-два порядка более продолжительные во времени, обусловленные изменением вязкости смеси [8–11]. Для этого в экспериментальной

установке применен ФНЧ. Лабораторная мешалка была снабжена встроенным подогревателем, что позволило снимать функциональные зависимости расхода мощности от температуры, а также стабилизировать температуру смеси. Типичная запись влияния параметров процесса на расход мощности и температуру приведена на Рис. 1. После ввода минерального материала в мешалку расход мощности на диаграмме возрастает до определенного значения, а затем стабилизируется, что свидетельствует о равномерном распределении частиц минеральных компонентов смеси в объеме. С введением в перемешиваемый минеральный материал гудрона расход мощности, потребляемой приводом мешалки, возрастает с последующей стабилизацией. На диаграмме, кроме изменений уровня расхода мощности, в этот период отмечаются изменения значений температуры смеси. В момент ввода инициатора окислительного процесса наблюдается резкое снижение расхода мощности и температуры. Снижение расхода мощности объясняется возникновением эффекта псевдооживления в перемешиваемой смеси. Инициатор процесса окисления (водная пульпа гипохлорида кальция) в результате резкого повышения температуры при контакте с перемешиваемой горячей смесью (180–220°C) в кратчайший промежуток времени превращается в пар с образованием в объеме смеси подобия микровзрывов [12–13]. Это вызывает при равномерной подаче инициатора псевдооживление перемешиваемой зернистой массы смеси, частицы которой под действием восходящих потоков пара оказываются взвешенными и приобретают текучесть. Снижение температуры смеси в этот период связано с потерями тепла на парообразование. Эффект псевдооживления продолжается во время подачи инициатора окислительного процесса и прекращается после эвакуации парогазовой смеси из мешалки. С окончанием псевдооживления смеси расход мощности существенно возрастает, что можно объяснить ростом удельного сопротивления сдвига, вызванного понижением температуры и качественным изменением состава вяжущего. В дальнейшем в лабораторном эксперименте температура смеси начинает расти. Это явление не имеет никакого отношения к процессам, происходящим при смешении, и может быть объяснено только наличием нагревателя и значительной (по отношению к массе смеси) массой самой нагретой мешалки, температура которой оказывается выше, чем температура смеси [14–15].

Так как после ввода инициатора окислительного процесса происходит структурообразование пленки вяжущего, то представляло определенный интерес проследить, как изменяется характер зависимости расхода мощности от температуры до и после ввода инициатора в одних и тех же смесях (Рис. 2). Как видно, экспериментальные точки с достаточной степенью точности можно аппроксимировать линейными функциями вида:

$$P(t) = P_0 - kt, \quad (1)$$

где $P_0, k - \text{const}$, t – температуры смеси.

Из полученных данных следует, что постоянные P_0, k принимают следующие значения: до ввода инициатора окислительного процесса $P_0 \in (70 - 110)$, $k \in (0,1 - 0,2)$; после ввода — $P_0 \in (160 - 220)$, $k \in (0,4 - 0,7)$.

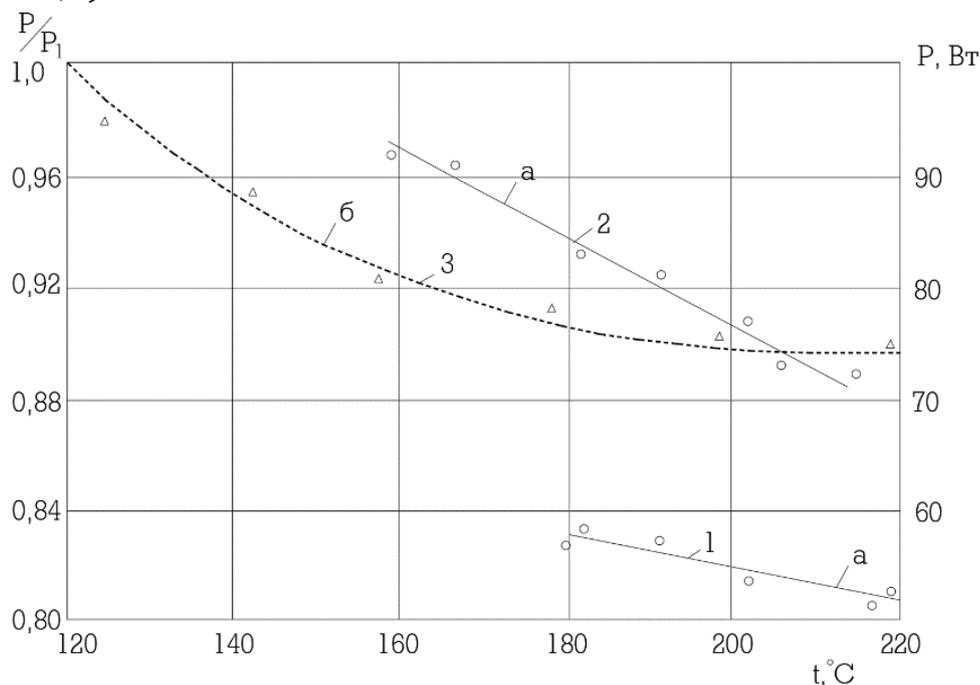


Рис. 2. Зависимость расхода мощности от температуры смеси:

- а – на лабораторной мешалке;
- б – на смесителе Д-597;
- 1,3 – до ввода инициатора процесса;
- 2 – после ввода инициатора процесса

В производственных условиях эксперимент проводился на смесителе Д-597. Так как привод мешалки выполнен на основе асинхронного двигателя, то схема измерения расхода мощности отличается от лабораторной. В разрыв одной из фаз питания двигателя мешалки подключался трансформатор тока И54М. Со вторичной обмотки И54М напряжение поступало на выпрямитель, далее на ФНЧ.

Для контроля и тарировки записи мощности на ленте шлейфового осциллографа использовался измерительный комплект К506, с помощью которого измерялась мощность, величина тока для каждой из фаз, напряжение между соответствующими фазами и правильность их чередования (см. рис. 1, пунктир). Как видно, характер изменения расхода мощности на производственном смесителе качественно отличался от изменений расходов мощностей в лабораторном эксперименте. Это

объясняется главным образом различной конструкцией мешалок и различными соотношениями масс металла к массам смесей (а следовательно, соотношениями их теплоемкостей).

Зависимость расхода мощности от температуры, аналогичную представленной на Рис. 2, на производственном смесителе Д-597 не удается получить, так как нет возможности целенаправленно изменять температуру смеси в мешалке. Таким образом, прирост мощности привода мешалки вследствие изменения консистенции вяжущего после ввода инициатора окислительного процесса можно оценить только аналитически. Для этого надо знать зависимость расхода мощности привода мешалки от температуры до ввода инициатора (Рис. 2, пунктир). Для этой функциональной зависимости наиболее удовлетворительно подходит эмпирическая формула (ошибка относительно экспериментальных данных менее 1 %).

$$\frac{P(t)}{P_1} = at^b + c, \quad (2)$$

где $a = 3,6 \cdot 10^5$; $b = -3,102$; $c = 0,877$; t – температура смеси; P_1 – расход мощности при $t = 120$ °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в лабораторных и производственных экспериментах наблюдался прирост мощности привода мешалки после начала изменения консистенции вяжущего и, следовательно, увеличения вязкости смеси. В связи с тем, что последнее обуславливает изменение физико-механических свойств асфальтобетона, можно сделать заключение о возможности создания прибора оперативного контроля и управления качеством асфальтобетона в процессе его приготовления. Достаточно простые зависимости (1), (2) позволяют технически реализовать их в приборе с использованием более простой (по сравнению с цифровой) аналоговой обработки полезного сигнала (напряжения, пропорционального расходу мощности привода мешалки). Использование данного исследования напрямую влияет на срок службы асфальтобетонного покрытия, увеличение срока службы в среднем составит 7–10 %.

Авторы заявляют что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Лазарев Ю.Г., Новик А.Н., Симонов Д.Л. Формирование потребительских и эксплуатационных свойств автомобильных дорог // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2016. – № 1(35). – С. 43–47. [Lazarev YuG, Novik AN, Simonov DL. Formation of consumer and operational properties of highways. *Technical and technological problems of service*. 2016;1(35):43-47. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25952921>
2. Скоробогатченко Д.А., Засорина Г.Д. Технико-экономическое обоснование строительства автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения на основании из переуплотненного грунта // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2019. – № 1(44). – С. 121–133. [Skorobogatchenko DA, Zasorina GD. Feasibility study for the construction of highways with low traffic intensity on the basis of overcompacted soil. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2019;1(44):121–133. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37422263>
3. Сенькин Н.А., Филимонов А.С., Халимбеков И.М. и др. Предложения по строительству эстакадных конструкций и транспортно-пересадочных узлов высокоскоростной магистрали в Санкт-Петербурге // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 99–123. [Senkin NA, Filimonov AS, Khalimbekov IM, et al, editors. Proposals for the construction of overpass structures and transport hubs for the high-speed highway in St. Petersburg. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):99-123 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217199-123
4. Плеханов П.А., Шматченко В.В. Стандартизация магнитолевитационных транспортных систем в России // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – №4. – С. 32–43. Plekhanov PA, Shmatchenko VV. Standardization of Maglev Transportation Systems in Russia. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(4):32-43. (In Russ., in Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20184432-43
5. Кривых Е.С. Метод объемного проектирования асфальтобетонных покрытий «спас» – как способ увеличения межремонтных сроков эксплуатации дорог России // Наука сегодня: теория и практика. 2019. – С. 12–16. [Krivykh ES. The method of volumetric design of asphalt concrete pavements "Spas" - as a way to increase the overhaul life of Russian roads. *Science Today: Theory and Practice*. 2019;12-16. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41198888>
6. Гатиятуллин М.Х., Исмагилов А.И. Эффективные методы содержания автомобильных дорог // Техника и технология транспорта. – 2017. – № 2(3). – С. 8. [Gatiyatullin MKh, Ismagilov AI. Efficient methods of road maintenance. *Technique and technology of transport*. 2017;2(3):8. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29771638>. Ссылка активна на 06.12.2022.
7. Трифонова А.А., Алексеев С.В., Егوشин А.М. Актуальные конструкции деформационных швов автодорожных мостов // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 42–54. [Trifonova AA, Alekseev SV, Yegoshin AM. Resent constructions of road bridges expansion joints. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):42-54 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217242-54
8. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И., Васильев А.Е. Особенности нагруженности автомобильных дорог в различных аспектах // Дальний восток: проблемы

- развития архитектурно-строительного комплекса. – 2016. – № 1. – С. 101–105. [Pugachev IN, Kulikov YuI, Vasiliev AE. Peculiarities of road loading in various aspects. *Far East: problems of development of the architectural and construction complex*. 2016;1:101-105 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140445>
9. Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д. Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений // Вестник МГСУ. – 2016. – № 6. – С. 118–125. [Yushkov VS, Kychkin VI, Barmin ND. Realizaciya diagnostiki i remonta mostovykh sooruzhenij. *Vestnik MGSU*. 2016;(6):118-125. (In Russ.)]. Ссылка активна на 17.03.2021. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26210458>
 10. Тимофеев Д.Р., Тимофеев Д.Д. Усиление мостовых конструкций с использованием композиционных материалов // Актуальные проблемы автомобильного, железно-дорожного, трубопроводного транспорта в Уральском регионе : материалы междунар.науч.-техн. конф. (1–3 декабря 2005 г.). Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 45–51. [Timofeev DR, Timofeev DD. Usilenie mostovykh konstrukcij s ispol'zovaniem kompozicionnyh materialov. *Aktual'nye problemy avtomobil'nogo, zhelezno-dorozhnogo, truboprovodnogo transporta v Ural'skom regione: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (1-3 dekabrya 2005 g.)*. Perm': PGTU. 2005;45-51. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002872497>
 11. Денисов В.П., Траутвайн А.И., Яковлев Е.А. Разработка математического инструмента расчета температуры смешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 8. – С. 8–13. [Denisov VP, Trautvain AI, Yakovlev EA. Development of a mathematical tool for calculating the temperature of mixing and compaction of an asphalt concrete mixture. *Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov*. 2019;8:8-13 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39559272>
 12. Лазарев Ю.Г., Сеницына Е.Б. Современное состояние проблемы совершенствования транспортной инфраструктуры // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2013. – № 4(26). – С. 71–74. [Lazarev YuG, Sinitsyna EB. The current state of the problem of improving the transport infrastructure. *Technical and technological problems of service*. 2013;4(26):71-74 (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20808009>
 13. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г. Многокритериальная оптимизация в задачах транспортного планирования // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – № 1(39). – С. 58–62. [Ermoshin NA, Lazarev YuG. Multicriteria optimization in transport planning problems. *Technical and technological problems of service*. 2013;4(26):71-74 (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29005493>
 14. Лазарев Ю.Г., Петухов П.А., Широких М.В. Формирование методики оценки точности (надежности) проектирования дорожных одежд нежесткого типа // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2(55). – С. 38–46. [Lazarev YuG, Petukhov PA, Shirokikh MV. Formation of a methodology for assessing the accuracy (reliability) of designing non-rigid type pavements. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016;2(55):38-46. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26366397>
 15. Гарсия А., Шланген Э., Мартин В.Д.В., Герберт В.Б. Оптимизация состава и процесса смешивания дренающего асфальтобетона со свойством самозакрытия трещин // Вестник томского государственного архитектурно-строительного

университета. – 2013. – № 3(40). – С. 367–382. [Garcia A, Schlangen E, Martin WDW, Herbert WB. Optimization of the composition and mixing process of draining asphalt concrete with the property of self-closing cracks. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013;3(40):367-382. (In Russ.)]. Ссылка активна на 06.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21150783>

Сведения об авторах:

Васильев Кирилл Андреевич, студент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

Аверченко Глеб Александрович, ассистент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;
E-mail: averchenko_ga@spbstu.ru

Information about the authors:

Kirill A. Vasilev, student;
eLibrary SPIN: 8250-4609; ORCID: 0000-0002-1013-2029;
E-mail: vkirill99@yandex.ru

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

Цитировать:

Васильев К.А., Аверченко Г.А. Экспериментальное исследование процесса перемешивания асфальтобетонных смесей // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 5–13. doi: 10.17816/transsyst2022845-13

To cite this article:

Vasilev KA, Averchenko GA. Experimental study of the mixing process of asphalt concrete mixtures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):5-13. doi: 10.17816/transsyst2022845-13

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC] 625.7/.8

DOI DOI 10.17816/transsyst20228414-30

© С.В. Алексеев, Д.Л. Симонов, А.С. Катикова

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

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ ДОРОГ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ

Статья посвящена особенностям учета влияния природно-климатических условий при проектировании автомобильной дороги. Показано, что условия окружающей среды напрямую влияют на специфику проектирования дорог. Однако, они могут играть двоякую роль: как содействовать, так и противодействовать длительной службе дорожных одежд и земляного полотна. Так как невозможно повлиять на погодные условия, то необходимо обеспечить полноценную защиту всех дорожных конструкций. Были проанализированы все факторы, влияющие на состояние дороги на ранних этапах проектирования. Сделан вывод, что при несоблюдении нормативных технических требований для каждой дорожно-климатической зоны качество автомобильной дороги и безопасность движения не будет обеспечена, в связи с этим были рассмотрены наиболее эффективные методы защиты и уменьшения негативных последствий воздействия окружающей среды.

Ключевые слова: природные условия, дорожное покрытие, автомобильные дороги, земляное полотно, водно-тепловой режим, атмосферные осадки.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© S.V. Alekseev, D.L. Simonov, A.S. Katikova

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

THE IMPACT OF NATURAL FACTORS ON THE CONDITION OF ROADS IN VARIOUS REGIONS OF RUSSIA

The article is devoted to the peculiarities of taking into account natural and climatic conditions when designing a highway. It is shown that environmental conditions directly affect the specifics of the designed roads. However, they can play a dual role: both to promote and counteract the long service life of the roadbed. Since it is impossible to influence the weather conditions, it is necessary to provide full protection of the highway. All factors affecting the road condition at the early stages of design were analyzed. It is concluded that if the regulatory and technical requirements are not met, the quality and safety of the road will

not be ensured for each road and climate area. In this regard, the most effective methods of protecting and reducing the negative effects of environmental impact were considered.

Key words: natural conditions, road surface, highways, roadbed, water-heat regime, atmospheric precipitation.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортные средства воздействуют на автомобильную дорогу одновременно с природно-климатическими условиями. Природно-климатические условия характеризуются множеством факторов, каждый из которых требует рассмотрения и индивидуального анализа. Их влияние непосредственно влияет на стоимость строительства, реконструкции, ремонта и эксплуатации автомобильных дорог, что в большинстве случаев является определяющей причиной выбора того или иного варианта решения на конкретном этапе жизненного цикла автомобильной дороги.

Исследование данной темы не теряет актуальности вот уже многие годы и, несомненно, будет оставаться таким из-за невозможности полностью исключить воздействие природно-климатических факторов на дорожную конструкцию. Отдельно стоит выделить важность данной проблемы в России, где разнообразие климатических зон по своим атмосферным, гидрологическим, грунтовым и другим условиям требует более тщательного изучения вопроса. Наиболее подробного рассмотрения требуют условия, в максимальной степени негативно влияющие на состояние дорог, такие как ландшафт местности, гидрологические и погодно-климатические условия.

В ходе проведения исследования произведен анализ научных статей, касающихся рассматриваемой темы.

Так в своей статье Шуваев А.Н., Панова М.В. говорят об актуальных в настоящее время проблемах, касающихся повышения надежности и долговечности дорожных одежд и земляного полотна. Авторы считают, что причинами разрушения дорог в сложных условиях строительства и эксплуатации являются не столько воздействие транспортных средств, сколько воздействия на дорогу природных факторов. Они описывают опыт применения новых конструкций насыпей на болотах с использованием синтетических нетканых материалов и георешеток на переувлажненных глинистых и торфяных грунтах, а также пути модификации цементогрунтов для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог [1].

В работе Пегин П.А., Корчагин В.А. привели результаты исследований влияния кратковременного природного фактора на изменения характеристик пропускной способности дороги и исследовали влияние эффекта солнечного ослепления (ЭСО) на транспортный поток. Они разработали мероприятия по снижению отрицательного воздействия

кратковременного природного фактора и повышения пропускной способности дороги [2].

В статье Ярмолинского А.И., Светенок А.И., Герасимова Е.О. рассмотрен вопрос об особенностях учета природно-климатических условий при реконструкции автомобильной дороги. Поставленные вопросы рассмотрены на примере реконструкции автомобильной дороги «Раздольное – Хасан», расположенной в Приморском крае [3].

Различия во влиянии природных факторов в зависимости от региона, то есть географического расположения, рассматривались на примерах нескольких статей в таких регионах как Краснодарский край, республика Башкостостан и Тульская область [4]. Привалова Н.М., Мамошин Е.Ю., Паньков В.А. описывают роль дождевых осадков и активной солнечной радиации, негативно воздействующей на составляющие асфальтобетона [4]. Работа Приваловой Н.М., Мамошина Е.Ю., Панькова В.А. описывает наиболее вредные для данного региона факторы разрушения дорожной одежды, а также дают характеристику новому виду асфальтобетона, широко используемому в последние годы на юге страны.

В работе Апталаева М.Н., Жалко М.Е. показано влияние температуры и влажности на процесс промерзания грунта и непосредственно на целостность дорожного покрытия. Представлены математические модели, отражающие процессы распределения температуры и фильтрационное движение жидкости в грунте. Также предложены два варианта улучшения технико-эксплуатационных показателей состояния автомобильных дорог, что в свою очередь окажет положительное влияние на безопасность и равномерность дорожного движения [5, 6],

Также были рассмотрены работы по анализу состояния дорожных сетей соседних стран, таких как Украина (статья Головченко Д.) и Беларусь (статья Леоновича И.И., Новгородского Я.Я., Буртыль Ю.В.), учитывающих актуальные для них нормы проектирования и контроля качества [7, 8].

Были изучены статьи, в которых приводится анализ состояния и изменения различных свойств дорожных покрытий. В статье Леонович И.И., Новгородского Я.Я., Буртыль Ю.В. оценивают динамику развития процессов регрессии ровности, описывают существующие методы оценки прочности в свете современных исследований [8].

Вопросы критериев оценки технического состояния автомобильных дорог были рассмотрены по материалам исследования Осиповой Т.В., Сорокина М.М., Осипова Д.Е., работа которых направлена на повышение надежности, безопасности и ремонтпригодности автомобильных дорог и мостовых сооружений, назначение режимов эксплуатации сооружения, а также выявления необходимости ремонта и реконструкции сооружений [9].

Работа Мевлидинова З.А., Тулянкиной Н.А., Хуторцова П.С, Володько А.П. подробно описывает степень воздействия природно-климатических факторов на дорожную конструкцию автомобильной дороги, в том числе от вида и мощности источников увлажнения дорожного покрытия и интенсивности температурных воздействий [10]. В трудах Бодосова Т.С. и Свиридова В.Л. описана проблема влияния сложных инженерно-геологических условий на эксплуатационное состояние автомобильных дорог Алтайского края, а также методы борьбы с ней [11]. В работе Хотунцева Ю.Л. выявлены проблемы экологии, в том числе связанные с ростом автомобилизации населения [12]. Статья Хомяка Я.В. и Скорченко В.Ф. «Автомобильные дороги и окружающая среда» раскрывает влияние природных факторов на месторасположение и способы проектирования различных категорий дорог, в зависимости от внешних факторов [13]. Вопрос экологической безопасности, остро стоящий на сегодняшний день, поднимается Хотунцевым Ю.Л. [14], об особенностях проектирования мероприятий по ремонту (реконструкции) пучинистых участков дороги подробно описано в методических рекомендациях [15, 16].

Вопросы разрушения автомобильных дорог рассматривались на протяжении многих лет. Так, коллектив авторов под руководством профессора Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета Б.С. Юшкова отмечает: «После ввода автомобильной дороги в эксплуатацию уже в первый год на поверхности покрытия наблюдаются поперечные трещины (морозобойные), располагающиеся с шагом через 40–60 м, после двух лет – 10–30 м и при этом без признаков износа и образования колеи» [17].

При оценке воздействия окружающей среды на дорогу Ванчугова В.А. и Обуздина М.В. рассмотрели условия эксплуатации и состояние автодороги. Определили и классифицировали источники воздействия на окружающую природную среду в период проведения строительных работ. Разработали мероприятия и рекомендации по снижению негативного воздействия ремонтной техники на атмосферный воздух, акустическую среду, почвенный покров прилегающей территории. [18].

Горная энциклопедия приводит следующее определение морозного пучения – процесса, являющегося одним из основных причин разрушения дорожной одежды: «Морозное пучение грунтов – процесс увеличения объема и деформирования дисперсных грунтов при промерзании и образования выпуклых форм на их поверхности» [19].

Вопрос экологической безопасности, остро стоящий на сегодняшний день, поднимается Кудрявцевым М.Н., Кагановичем В.С., а также Юмашевым В.М. и Казарновским В.Д. В статье активно используются нормативные документы, актуальные в сфере дорожного строительства и

способы проектирование наиболее устойчивых конструкций дорожных одежд [20–22].

Цель исследования – определить, как влияют природно-климатические условия на состояние автомобильных дорог. Изучить методы предотвращения разрушения дорожных покрытий в разных регионах России (Краснодарский край, Республика Башкортостан, Тульская область).

Конкретными задачами для достижения цели являются:

1. Определить основные факторы, влияющие на состояние автомобильной дороги;
2. Определить степень и характер их влияния;
3. Рассмотреть способы минимизации или предотвращения влияния данных факторов.

МЕТОДЫ

Эффективная работа автомобильной дороги, соответствующая всем требованиям существующих норм, во многом зависит от влияния на нее различных природных факторов, например, климата, рельефа, гидрологических условий и почвенно-геологического строения местности. Особенно сильное влияние на условия эксплуатации дороги оказывают именно климатические условия. Они характеризуются такими показателями как количество осадков, амплитуда температуры, испарение, скорость колебания температуры, глубина промерзания, мощность снегового покрова и солнечная радиация.

Особо опасным для регионов с сезонными изменениями климата являются перепады температур, наиболее воздействующие на элементы автомобильной дороги в осенний и весенний периоды. Опасность частых переходов температур воздуха через 0°C заключается в том, что в земляном полотне при замерзании возникают процессы перераспределения влаги. Образуются ледяные прослойки. Весной при повышении температуры и ее стабильном установлении выше 0°C прослойки оттаивают, что вызывает переувлажнение грунта земляного полотна и подстилающих слоев. Из-за этого происходит временное снижение прочности дорожной одежды, накопление деформаций и, как следствие, сокращается срока службы. Следовательно, состояние при колебаниях температуры в районе нуля, при котором вода оттаивает и снова замерзает, является самым неблагоприятным для земляного полотна дороги.

Состояние покрытия при таких условиях меняется в течение суток от хрупкого до упругого, испытывая большое число циклов «замораживания-размораживания». Так как асфальтобетон является материалом коагуляционного типа, в слоях дорожной одежды с использованием асфальтобетона, минеральные частицы покрыты пленками органического

вяжущего. Упругие свойства покрытия значительно повышаются при понижении температуры и уменьшении продолжительности действия нагрузок. С повышением температуры и увеличением продолжительности действия нагрузок пластические свойства покрытия начинают преобладать над упругими. В условиях отрицательных температур покрытия из таких материалов, которые содержат органическое вяжущее, приобретают хрупкие свойства.

Водно-тепловой режим дорожного полотна автомобильной загородной дороги значительно отличается от режима городских дорог. Связано это не только со спецификой движения транспортного потока по загородным участкам, но и с требованиями, предъявляемыми к основаниям дорог. В частности, загородные автомобильные дороги, как правило, не имеют в основании пересечений с теплопроводами. Следовательно, в грунтовом массиве нет внутренних источников тепла. Этот факт создает первоочередную необходимость обеспечения водоотведения.

Нормативная документация классифицирует все дренажные системы на два основных вида: сооружения открытого водоотвода и сооружения закрытого водоотвода. К сооружениям открытого водоотвода относят водоотводные каналы, кюветы, а также водосбросные лотки. Основная задача этих сооружений – не допустить аккумуляции воды на поверхности дорожной одежды и у основания земляного полотна.

К дренажным конструкциям, обеспечивающим подземное водоотведение, относят перехватывающие, подкюветные, врезные и др. дренажи. Основной целью мероприятий по регулированию водно-теплого режима работы земляного полотна является уменьшение амплитуды колебания влажности [23]. На основе конструктивных особенностей и назначения все мероприятия по регулированию влажности грунтового массива можно разделить на четыре группы:

1. Ограничение проникновения поверхностных вод в конструктивные слои дорожной одежды и земляное полотно;
2. Замена, усиление и армирование грунтов основания;
3. Отвод воды из дорожных одежд;
4. Использование дополнительных конструктивных слоев.

Другим фактором, наносящим меньший, но, тем не менее, значительный вред автомобильной дороге, является солнечная радиация. Под ее действием в асфальтобетонной покрытии нагревается битум, из-за чего могут происходить деформации, называемые «колеями», то есть вдавливание асфальтобетона под весом проезжающих автомобилей. Разработка новых видов дорожных покрытий, в частности модификаций асфальтобетона, позволяет компенсировать вред, наносимый транспортным потоком дорожной конструкции. Один из них, битумно-резиновый композиционный, менее подвержен таким видам деформации. Кроме того, асфальтобетон на основе битумно-резинового

композиционного вяжущего является экологически чистым и имеет другие преимущества. Такие вяжущие неоднородные по своему химическому и фазовому составу и структуре являются типичными композиционными материалами, их полезные свойства определяются главным образом свойствами его составляющих и тем, как они взаимодействуют в общей системе. Дисперсно-эластичное армирование асфальтобетона осуществляется частицами полимерного компонента, в роли которой выступает резиновая крошка в составе вяжущего. Данный вид асфальтобетона уже широко применяется на юге страны, где зарекомендовал себя с лучшей стороны.

Немалую роль в разрушении дороги играют дождевые осадки. Атмосферные осадки попадают через нарушенный слой асфальтобетона в дорожную одежду и тем самым вымывают дополнительные слои основания. Из-за проезжающих автомобилей происходит дальнейшее разрушение покрытия, вследствие чего образуются выбоины. Это происходит в тех местах дороги, где не обеспечен отвод поверхностных вод с проезжей части.

Чтобы предотвратить разрушения дорожной одежды производят ряд практических мероприятий эксплуатационного содержания, таких как:

- удаление от дороги талых вод, очищение от снега канав и обочин;
- прокопка в обочинах открытых канавок, в которые просачивается лишняя вода.

Если данные меры не помогают, дорожным организациям предоставлено право ограничивать или прекращать проезд по опасным участкам до полного восстановления поврежденных мест.

Сильное влияние на состояние автомобильной дороги оказывает ветер. Сейчас считается, что вырубка деревьев, растущих в полосе отвода, ведет к повышению безопасности на дороге. Однако нормы проектирования не учитывают, что деревья защищают дорогу от ветра. Под его воздействием дорога подвергается неравномерному осушению, глубокому промерзанию зимой и быстрому неравномерному оттаиванию весной, теряя свои прочностные характеристики. Так, следует учитывать скорости воздушных масс и их направление. Во избежание разрушения дорожных конструкций следует изменить требования к содержанию полосы отвода и учитывать при проектировании розу ветров.

В процессе реконструкции автомобильной дороги должны учитываться особенности влияния природно-климатических условий, территория строительства, дорожно-климатическое районирование. Обеспечение качества строительства автомобильной дороги зависит от соблюдения технологических требований. Невыполнение нормативных требований отрицательно скажется на эксплуатационных качествах земляного полотна и дорожной одежды.

Учету природно-климатических условий именно в процессе реконструкции автомобильной дороги, необходимо уделить особое внимание (Рис.). Если в процессе проектирования и строительства не были учтены важнейшие факторы, то в процессе реконструкции их учету должно быть уделено особое внимание. При реконструкции важно обеспечить правильную реализацию проектных решений в реальной дорожной конструкции. Следовательно, проект организации реконструкции, рассматриваемой автомобильной дороги, обязательно должен учитывать специфику климата района проектирования.

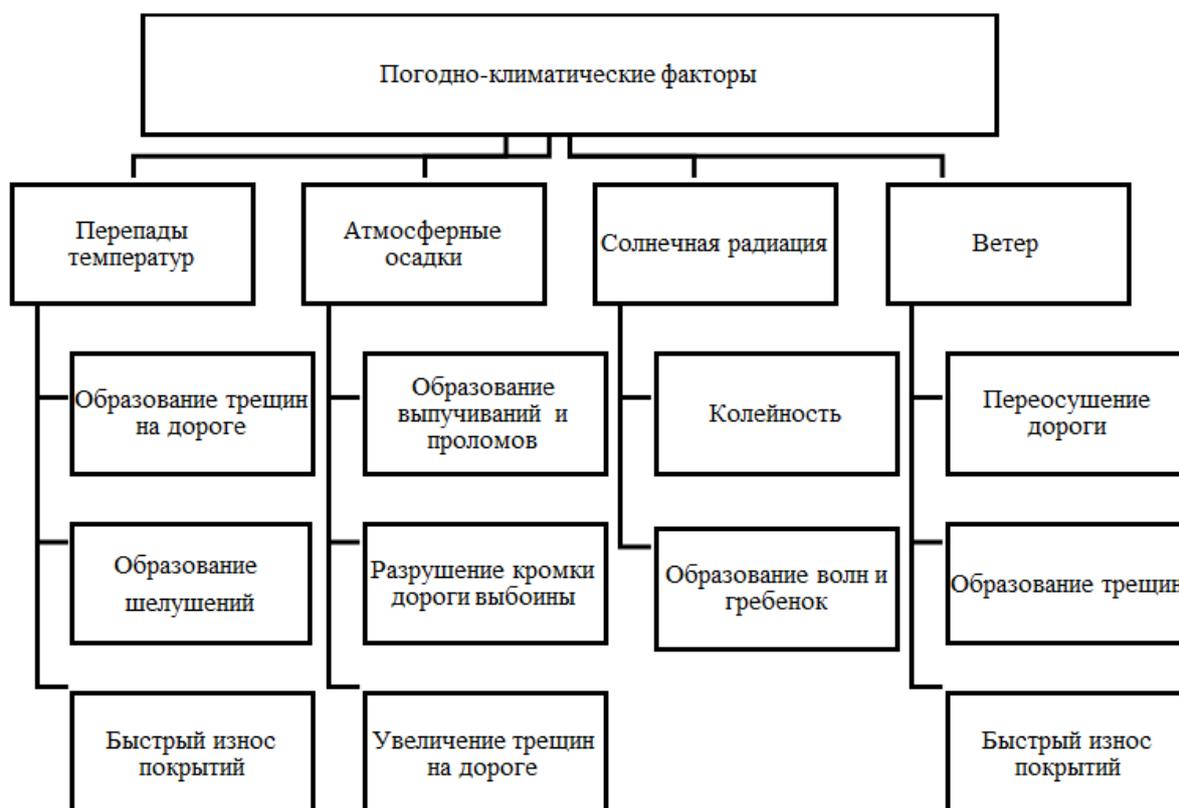


Рис. Схема воздействия на дорожную конструкцию

Рассмотрим, как предотвращают возможные разрушения автомобильных дорог в разных регионах Российской Федерации

1. Краснодарский край. Климат Краснодарского края характеризуется избытком солнечной радиации при умеренном увлажнении. Чтобы противостоять солнечной радиации в Краснодарском крае специально используется новый вид асфальтобетона: битумно-резиновый композиционный вяжущий. Он менее подвержен разным видам деформаций и не позволяет образовываться «колеям».

Последние годы заметно увеличилось количество и масштабы наводнений, усилились берегоразрушительные и оползневые процессы, что послужило причиной создания многочисленных чрезвычайных

ситуаций на объектах дорожного хозяйства. В связи с этим разработана государственная программа «Развитие сети автомобильных дорог Краснодарского края», направленная на поддержание надлежащего технического состояния автомобильных дорог общего пользования местного значения городских округов Краснодарского края [22]. В результате этой программы создаются укрепительные сооружения (закрепление масс горных пород подпорными и анкерными сооружениями), также осуществляется на самых опасных участках дренажи, защита от подмыва и размыва.

2. Республика Башкортостан. Климат достаточно влажный, зима умеренно суровая, лето теплое. В отдельные холодные годы продолжительное время стоят сильные морозы. Для продления срока службы автомобильных дорог в условиях резкого перепада температур используется реагент «Бионорд». Обработка химическим составом вместо песка имеет свои преимущества в борьбе с появлением гололедицы на улицах Уфы, имеет и свои недостатки. Этот реагент был выбран, так как песок создает грязь, уничтожает растения и ведет к появлению пыльных бурь летом. Соль тоже не подошла, потому что «плохо смывается», от нее страдают растения и обувь людей. Реагент легко смывается с поверхностей автомобилей, обуви и элементов благоустройства дорог. В остальное время используется сухая очистка дорог до асфальта.

Также в рамках модернизации магистральной структуры в строительстве новых объектов широко используется щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) – покрытие с высоким содержанием щебня и стабилизирующих добавок, предназначенных для удержания связующего вещества (битума) от стекания.

Стабилизирующая добавка производится из хризотил-асбеста, который известен уникальными свойствами. Гранулы этого минерала увеличивают толщину битумной пленки, повышая количество битума в смеси. Это спасает дорожное покрытие от расслаивания и повышает его долговечность. Расход материалов на квадратный метр при укладке ЩМА ниже, чем у горячего асфальтобетона.

Применение помогает сохранить долговечность покрытия, и снижает затраты на строительство и ремонт дорог. ЩМА успешно борется с одной из типичных проблем – частыми перепадами температуры с переходом через ноль.

3. Тульская область. Климат Тульской области умеренно континентальный с умеренно холодной зимой с частыми оттепелями и теплым летом. Среднегодовая температура составляет +5 °С, средняя температура самого холодного месяца –10 °С, самого теплого +20 °С. Тип климата Dfb (умеренный (влажный) континентальный климат) распространён в Центральной и Восточной Европе, и северо-востоке США. На территории России к нему также относятся такие крупнейшие

города, как Москва и Санкт-Петербург. В данных условиях умеренного (влажного) континентального климата на состояние дорожных одежд большое влияние оказывает значительная влажность на протяжении всего года. Для предотвращения разрушений необходимо особое внимание к защите и сокращению проникновения влаги к конструкции дорожных одежд и земляное полотно.

Для предотвращения большого негативного влияния повышенной влажности на состояние дорожных одежд необходима дополнительная защита как основания, так и покрытия. В последние годы часто используются новейшие технологии при строительстве и ремонте дорог. Например, в 2019 году при ремонте Тула-Ленинского шоссе верхний слой был устроен с использованием покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона. Материал повышает эксплуатационные характеристики дороги и уменьшает колеиность. Также за счет более высокой устойчивости ЩМА к деформациям увеличится срок службы покрытия и как следствие межремонтный срок. На Комсомольском шоссе дорожники применяли технологию холодной регенерации, то есть повторного использования материалов при устройстве конструктивных слоев дорожных одежд [24, 25]. Это уменьшит износ дорожного полотна и увеличит срок его службы.

Для улучшения эксплуатационных характеристик дорог применяются геосинтетические материалы. Этот материал может применяться для различных функций, в том числе для дренажа, разделения слоев, гидроизоляции, контроля эрозии и стабилизации поверхностей и ограждения. В данных условиях высокой влажности его применение может значительно повысить долговечность дорожных одежд.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования приведены в Табл.

К погодно-климатическим факторам относятся: атмосферное давление, солнечная радиация, температура и влажность воздуха, осадки (дождь, снегопад, метель, гололед, туман), а также сочетание этих факторов.

Их воздействие создает водно-тепловой режим земляного полотна, то есть изменения в полотне и слоях одежд влажности и температуры. Именно изменение этих характеристик влияет на прочность и долговечность дорог, снижает транспортно-эксплуатационные свойства.

Этим руководствуются, проектируя дорожную одежду и земляное полотно, чтобы в неблагоприятных условиях прочность конструкции была обеспечена.

Таблица. Влияние и предотвращение природных факторов

№ п/п	Природный фактор	Влияние на автомобильную дорогу	Предотвращение факторов
1	Перепад температур	Образуются ледяные прослойки, из-за которых происходит разрушение дорожной одежды	Обеспечение отвода талых вод с поверхности покрытия, обочин и основания насыпи
2	Солнечная радиация	Деформация, выдавливание асфальтобетона	Разработка новых видов дорожных покрытий
3	Дождевые осадки	Разрушение покрытия	Обеспечение поверхностного водоотвода
4	Ветер	Осушение, глубокое промерзание грунта зимой и быстрое оттаивание весной	Уменьшить вырубку деревьев, растущих в полосе отвода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория России включает в себя самые разные климатические зоны. Существенное влияние на состояние дорог и условия движения автомобилей оказывают природно-климатические условия. Важно учитывать все факторы, влияющие на состояние дороги на этапе проектирования. Необходим своевременный контроль выполнения работ на участке строительства. Следовательно, в процессе проектирования автомобильной дороги должны учитываться особенности влияния природно-климатических условий, территория строительства, дорожно-климатическое районирование. Обеспечение качества строительства автомобильной дороги зависит от соблюдения технологических требований. При невыполнении нормативных и технических требований качество и безопасность автомобильной дороги не будет обеспечена. Особое внимание надо уделить учету природно-климатических условий в процессе строительства автомобильной дороги. Важно обеспечить правильную реализацию проектных решений, а проект организации строительства (реконструкции) обязательно должен учитывать специфику климата.

В данной статье изучены и выделены наиболее влияющие на состояние автомобильной дороги факторы, дана характеристика каждого из них, подробно описаны их действия. Были описаны существующие возможные пути предотвращения и снижения воздействия, что в дальнейшем может быть использовано для разработки новых решений. Результаты анализа кратко представлены в Табл. с поясняющими комментариями.

1. В качестве основных факторов, влияющих на состояние автомобильной дороги, выделены: перепады температур, солнечная радиация, дождевые осадки и ветер;

2. Каждый из факторов разрушительно влияет на качество и безопасность автомобильной дороги и требует учета при разработке проекта и на всех этапах жизненного цикла автомобильной дороги;

3. Для уменьшения их воздействия необходимо по возможности ограничивать взаимодействие составляющих дороги с данными факторами с помощью приведенных выше методов, которые могут отличаться в зависимости от расположения, бюджета, местной доступности и др.

Большая часть автомобильных дорог Российской Федерации спроектирована и построена в 50–70-х годах прошлого века по ВСН и СНиП ныне не существующих. В этой связи при реконструкции существующих дорог и строительстве новых следует руководствоваться актуальными на данный момент ОДМ (отраслевыми дорожными нормами) и СП (свод правил). Для проектирования основных элементов автомобильных дорог с 10 августа 2021 года начал действовать СП 34.13330 – 2021 «Автомобильные дороги», для проектирования дорожных одежд с 1 июня 2019 года введены в действие новые документы (ГОСТ Р 58401.1 – 2019 «Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования», ГОСТ Р 58401.2–2019 «Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичный. Система объемно-функционального проектирования»), указанные руководящие документы учитывают воздействие неблагоприятных факторов, в том числе и природно-климатических на конструкцию земляного полотна и дорожной одежды автомобильных дорог. Следовательно, в процессе проектирования и при строительстве дорог необходимо неукоснительно руководствоваться требованиями современных документов.

Настоящая статья дает предпосылки для дальнейшего, более углубленного изучения темы, разработки конкретных предложений по учету воздействия природно-климатических условий на работу конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна в целях повышения безопасности и качества автомобильных дорог.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Шуваев А.Н., Панова М.В. Надежность и долговечность автомобильных дорог в сложных природных условиях // Актуальные вопросы проектирования

- автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО Гипродорнии. – 2013. – № 4(63). – С. 14–19. [Shuvaev AN, Panova MV. Reliability and durability of roads in difficult environmental conditions. *Actual issues of road design. Collection of scientific papers of JSC Giprodorniya* 2013;4(63):14-19 (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21074518&ysclid=lb5iwq4mev696025073> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
2. Пегин П.А., Корчагин В.А. Влияние кратковременных природных факторов на пропускную способность // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2011. – № 7. – С. 37–39. [Pegin PA, Korchagin VA. Increasing of road capacity under the influence of a short-term natural factor. *Transport: science, technology, management. Scientific Information Collection* 2011;(7):37-39 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17678281>
 3. Ярмолинский А.И., Светенок А.И., Герасимова Е.О. Особенности учета природно-климатических условий при реконструкции автомобильной дороги (на примере автомобильной дороги «Раздольное-Хасан» км 49 – км 60) // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2017. – № 1. – С. 148–150. [Yarmolinsky AI, Svetenok AI, Gerasimova EO. The peculiarities of registratio naturally climatic conditions during the reconstruction of an automobile road (on the exanple of the automobile road "Razdolnoye - Khasan km 49-km 60". *The Far East: problems of architectural and construction complex* 2017;(1):148-150 (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30770809&ysclid=lb5jq5byf0218859819>
 4. Привалова Н.М., Мамошин Е.Ю., Паньков В.А. Влияние природных факторов на состояние автомобильных дорог Краснодарского края. // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 6 – С. 87–88. [Privalova NM, Mamoshin EY, Pankov VA. Influence of natural factors on the condition of roads in Krasnodar region. *Fundamental Researches* 2008;(6):87-88 (In Russ.)]. Доступно по: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=3242&ysclid=lb5jvqrpqnt768476577> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
 5. Апталаев М.Н., Жалко М.Е. Влияние водно-теплового режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды // Транспортные сооружения. – 2016. – № 4. – С. 45–46. [Aptalaev MN, Zhalko ME. Effect of the water-and-thermal regime of the auto-road base on the pavement state. *Transport engineering* 2016;(4): 45-46 (In Russ.)]. doi: 10.15862/02TS416
 6. Осипова Т.В. Параметры оценки технического состояния автомобильной дороги. // Вестник научных конференций. – 2017. – № 4–5(20). – С. 122–124 [Osipova TV. Parametry ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'noj dorogi. *Vestnik nauchnyh konferencij*. 2017;4,5(20):122-124 (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29331046&ysclid=lb5kpp1bwn881817297> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
 7. Леонович И.И., Новгородский Я.Я., Буртыль Ю.В. Транспортно-эксплуатационное состояние сети республиканских автомобильных дорог и основные направления повышения их качества // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2008. – № 6. – С. 56–63. [Leonovich II, Novgorodsky YaYa, Burtyl YV. Transportno-ekspluatacionnoe sostoyanie seti respublikanskih avtomobil'nyh dorog i osnovnye napravleniya povysheniya ih kachestva. *Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008;(6):56-63 (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25911331&ysclid=lb5kxgps16815639427>

8. Осипова Т.В., Сорокин М.М., Осипов Д.Е. Критерии оценки технического состояния автомобильных дорог // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – № 1(27). – С. 28–30 [Osipova TV, Sorokin MM, Osipov DE. Kriterii ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2018;1(27):28-30 (In Russ.)]. Доступно по: <http://trts.esrae.ru/47-341> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
9. Мевлидинов З.А., Тулянкина Н.А., Хуторцов П.С., Володько А.П. Влияние изменения климата на состояние дорожного покрытия на автомобильных дорогах в Брянской области // Инновации в строительстве. – 2017. – № 1. – С. 227–231. [Mevlidinov ZA, Tulyankina NA, Khutortsov PS, Volodko AP. Vliyanie izmeneniya klimata na sostoyanie dorozhnogo pokrytiya na avtomobil'nyh dorogah v Bryanskoj oblasti. *Innovacii v stroitel'stve* 2017;(1):227-231 (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32688666&ysclid=lb51a9vv8z969763187> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
10. Бодосова Т.С., Свиридов В.Л. Влияние сложных инженерно-геологических условий на эксплуатационное состояние автомобильных дорог Алтайского края. // Труды кафедры «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия». – 2011. – С. 21–29. [Bodosova TS, Sviridov VL. Vliyanie slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh uslovij na ekspluatacionnoe sostoyanie avtomobil'nyh dorog Altajskogo kraja. *Trudy kafedry "Osnovaniya, fundamenty, inzhenernaya geologiya i geodeziya"*; 2011. p. 21-29. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35013059&pff=1>
11. Солодская М.Г. Определение наиболее значимых факторов при анализе эксплуатационного состояния автомобильных дорог // Наука и техника. – 2017. – № 6. – С. 493–497 [Solodkaya MG. Determination of most significant factors for analysis of highway operating conditions. *Science & Technique*. 2017;(6):493-497. (In Russ.)]. doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-493-497
12. Хомяк Я.В., Скорченко В.Ф. Автомобильные дороги и окружающая среда. Киев: Вища школа, 1983. – 160 с. [Khomyak YV, Skorchenko VF. *Avtomobil'nye dorogi i okruzhayushchaya sreda*. Kiev: Vishcha shkola; 1983. 160 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001152800?ysclid=lb51was45b641791362> Ссылка доступна на: 02.12.2022.
13. Хотунцев Ю.Л. Экология и экологическая безопасность. – М.: Академия, 2004. – 480 с. [Hotuntsev YL. *Ekologiya i ekologicheskaya bezopasnost'*. Moscow: Akademiya; 2004. 480 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002494884/?ysclid=lb51yceurk866513531
14. Типовые решения по восстановлению несущей способности земляного полотна и обеспечению прочности и морозоустойчивости дорожной одежды на пучинистых участках автомобильных дорог: утв. Росавтодором 14.06.2000. - ГП Росдорнии, 2000 [Tipovye resheniya po vosstanovleniyu nesushchej sposobnosti zemlyanogo polotna i obespecheniyu prochnosti i morozoustojchivosti dorozhnoj odezhdy na puchinistykh uchastkah avtomobil'nyh dorog: utv. Rosavtodorom 14.06.2000. - GP Rosdornii, 2000. (In Russ.)]. Дата обращения: 02.12.2022. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200026349?ysclid=lb6bwp2ye491309920>
15. Алексеев С.В., Титова Л.А. Возможные способы ликвидации расслоения асфальтобетонной смеси. В сборнике: Актуальные проблемы транспортного обеспечения военной безопасности государства. Сборник материалов межвузовской научно-практической конференции. – 2019. – С. 224–228. [Alekseev SV, Titova LA. Vozmozhnye sposoby likvidacii rassloeniya asfal'tobetonnoj smesi. V sbornike: Aktual'nye problemy transportnogo obespecheniya voennoj

- bezopasnosti gosudarstva. Sbornik materialov mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii; 2019. pp. 224-228 (In Russ.).
16. Бургонутдинов А.М., Юшков Б.С., Бурмистрова О.Н., Воронина М.А. Причины образования деформаций и разрушений на покрытии автомобильных дорог // Известия Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 1(17). – С. 89–93. [Burgonutdinov AM, Yushkov BS, Burmistrova ON, Voronina MA. Reasons for formation of deformations and destructions on the covering of highways. *Izvestiya Komi NC UrO RAN* 2014;1(17):89-93 (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21444722&ysclid=lb6fest1pp536735720>
 17. Ванчугова В.А., Обуздина М.В. Оценка воздействия на окружающую среду при капитальном ремонте автомобильной дороги // Транспортная инфраструктура сибирского региона. – 2016. – № 1. – С.155–185. [Vanchugova VA, Obuzdina MV. Osenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu pri kapital'nom remonte avtomobil'noj dorogi. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona*. 2016;(1):155-185 (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26416227>
 18. Морозное пучение. [Moroznoe puchenie. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.12.2019. Доступно по: <http://www.mining-enc.ru/m/moroznoe-puchenie>
 19. Пискун А.С., Ганец Г.В., Аверченко Г.А. Методы натурного обследования железобетонного моста на примере моста через реку Косопаха. Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 7. – С. 957–967. [Piskun AS, Ganets GV, Averchenko GA. Methods of on-site inspection of a reinforced concrete bridge exemplified by the bridge over the river Kosopasha. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(7):957-967 (In Russ.)]. doi: 10.22227/1997-0935.2020.7.957-967
 20. Исмаилов А.М. Оптимизационно-квалиметрическая модель процесса проектирования асфальтобетонных смесей требуемого качества // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 11–2. – С.270–279. [Ismailov AM. Optimization-qualimetric model of the process of designing asphalt-concrete mixes of required quality. *Modern high technologies* 2019;11-2:270-279 (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41594367&ysclid=lb6g6igxdg637682245> Ссылка активна на: 02.12.2022.
 21. Государственная программа Краснодарского края «Развитие сети автомобильных дорог Краснодарского края» [Gosudarstvennaya programma Krasnodarskogo kraja "Razvitie seti avtomobil'nyh dorog Krasnodarskogo kraja". [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 20.02.2020. Доступно по: <http://docs.cntd.ru/document/430643121>
 22. Кириллов Ф.А. Особенности регулирования водного режима земляного полотна и оснований дорожных одежд // Технологии, машины и производство лесного комплекса: материалы международной научно-практической конференции / ВГЛТА. – Воронеж, 2004. – ч. II. – С. 52–56. [Kirillov FA. Features of regulation of the water regime of the road bed and bases of pavements. *Technologies, machines and production of the forest complex: materials of the international scientific practical conference*. VGLTA, Voronezh; 2004. 2004;P:52-56. (In Russ.)].
 23. Юстикова Л.Н., Симонова А.С., Трепалин В.А., Чумаков П.В. Применение современных способов регенерации дорожных покрытий. В сборнике: инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии). Материалы II Всероссийской научно-практической конференции / под редакцией М.П. Клековкиной. 2020. – С. 96–99. [Yustikova LN, Simonova AS, Trepalin VA, Chumakov PV. Application of road pavement regeneration methods. *V sbornike: innovacii i dolgovechnost' ob'ektov transportnoj infrastruktury*

(*materialy, konstrukcii, tekhnologii*). *Materialy II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. М.Р. Klekovkina, edd. 2020. pp. 96-99. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?ysclid=lb6qhi9ssq229747936&id=42909892&pff=1>
Ссылка доступна на: 02.12.2022.

24. Чернова Н.А., Бирюков О.Р., Ермошин Н.А. Влияние стабилизирующих добавок из целлюлозы на свойства щебеночно-мастичного асфальта. В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 255–257. [Chernova NA, Biryukov OR, Ermoshin NA. Vliyanie stabiliziruyushchih dobavok iz cellyulozy na svojstva shchebenochno-mastichnogo asfal'ta. V sbornike: Nedelya nauki ISI. Materialy vserossijskoj konferencii v 3-h chastyah. Inzhenerno-stroitel'nyj institut Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo. St. Peterburg; 2021. pp. 255-257. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 02.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?ysclid=lb6qob6bic120377627&id=46294834>

Сведения об авторах:

Алексеев Сергей Викторович, доцент, Инженерно-строительный институт,
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Симонов Дмитрий Леонидович, доцент, Инженерно-строительный институт,
eLibrary SPIN: 8900-7131; ORCID: 0000-0002-4912-3736;
E-mail: smn8366@yandex.ru

Катикова Арина Сергеевна, студент, Инженерно-строительный институт;
ORCID: 0000-0002-0091-1790; ResearcherID: GQR-0855-2022;
E-mail: arina.katikova@gmail.com

Information about the authors:

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

Dmitry L. Simonov, associate professor, Institute of Civil Engineering;
eLibrary SPIN: 8900-7131; ORCID: 0000-0002-4912-3736;
E-mail: smn8366@yandex.ru

Arina S. Katikova, student, Institute of Civil Engineering;
ORCID: 0000-0002-0091-1790; Researcher ID: GQR-0855-2022;
E-mail: arina.katikova@gmail.com

Цитировать:

Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 14–30. doi: 10.17816/transsyst20228414-30

To cite this article:

Alekseev SV, Simonov DL, Katikova AS. The impact of natural factors on the condition of roads in various regions of Russia. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):14-30. doi: 10.17816/transsyst20228414-30

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC]656.332

DOI 10.17816/transsyst20208431-45

© **В.В. Костенко¹, Д.С. Коробов²**

¹ Петербургский Государственный Университет путей сообщения
Императора Александра I

² Санкт-Петербург – Витебский центр организации работы
железнодорожных станций
(Санкт-Петербург, Россия)

ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАРЬЕРНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Исследование проводилось с целью изучения, анализа и обобщения технических и технологических особенностей рудных ходов предприятий промышленного железнодорожного транспорта. В результате проведена классификация отдельных пунктов рудных ходов, описаны особенности инфраструктуры, организации движения поездов, грузовой работы, подвижного состава, выявлены возможности для повышения эффективности грузовых перевозок.

Ключевые слова: промышленный железнодорожный транспорт, карьерный железные дороги, подвижной состав, тяговый агрегат, железнодорожные станции, управление движением поездов.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© **V.V. Kostenko¹, D.S. Korobov²**

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

² St. Petersburg – Vitebsk center for organization of the work of railway stations
(St. Petersburg, Russia)

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF QUARRY RAILWAYS

The research was carried out with the aim of studying, analyzing and research the technical and technological features of ore railways of industrial transport enterprises. As a result, the classification of operation points of ore railways was carried out, the features of the infrastructure, the train organization, freight work, rolling stock were described, and opportunities for improving the efficiency of freight transportation were identified.

Key words: industrial railway transport, quarry railways, rolling stock, traction unit, railway stations, train traffic control.

ВВЕДЕНИЕ

Среди специализированных железнодорожных линий в мире можно выделить сегмент специализированных грузовых магистралей (СГМ). Они предназначены для массовых перевозок одного или нескольких видов груза с почти полным отсутствием других видов железнодорожных перевозок. Подобные магистрали нечасто встречаются в России. Однако помимо железных дорог общего пользования есть множество предприятий промышленного железнодорожного транспорта (ППЖТ), на которых в нашей стране успешно практикуются принципы СГМ.

ППЖТ играют важную роль в работе сети железных дорог, они предназначены для обработки прибывших с внешней сети составов, их выгрузки, формирования, обслуживания, погрузки и отправляющихся составов вновь на общую сеть [1, 2]. Назначения у ППЖТ встречаются самые разнообразные – заводские, карьерные, логистические и т.д. [3]. Проектирование и строительство очередей горнообогатительного комбината, сети карьерной железнодорожной сети и разработка непосредственно карьера – это сложные взаимосвязанные процессы, занимающие несколько десятилетий, начиная с геологической разведки местности задолго до строительства комбината и заканчивая моментом добычи последней тонной руды.

В настоящем исследовании основное внимание уделено технологическим путям горно-обогатительных комбинатов и угольных разрезов, поскольку для этих путей характерно наибольшее количество особенностей специализированных линий и отличий от железнодорожного транспорта, как общего, так и необщего пользования. На территории России технологические линии рудных ходов проектируются на основе норм [4], в отличие от путей общего и необщего пользования, которые должны соответствовать нормам [5].

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА КАРЬЕРНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Карьерные железнодорожные сети включают в себя сети горнообогатительных комбинатов (ГОКов), угольных и рудных разрезов [6]. В большинстве случаев цеха ГОКа располагаются вдоль линии общего пользования и в то же время в непосредственной близости к карьере, чтобы уменьшить пробег и парк технологических поездов, доставляющих сырье из карьера на ГОК. Самыми значительными отличиями рудных ходов от сети общего пользования являются уклоны большой величины (от 15 до 60 ‰), а также малые радиусы кривых (от 180 до 80 м), поскольку карьер представляет собой ограниченное пространство для

развития линии, стесняя возможности для проектирования железнодорожной линии крутыми склонами.

Также к значимым отличиям можно отнести короткую протяженность рудных ходов (до нескольких десятков км) по сравнению с магистралями железнодорожной сети общего пользования (несколько сотен – несколько тысяч километров).

Как правило, карьерная железнодорожная сеть проектируется двухпутной (на второстепенных ответвлениях допустимо сооружать однопутную линию) со стандартной для постсоветского пространства шириной колеи 1520 мм, допускается до переустройства содержать железнодорожную сеть колеи 1524 мм. В таком случае карьерная сеть соединяется с проходящей поблизости железнодорожной линией общего пользования. Это делается для возможности подавать грузовые составы под погрузку и выгрузку на территории промышленного предприятия, а также для возможности вывоза технологических транспортных средств на ремонтные заводы через общую железнодорожную сеть.

На карьерных железных дорогах практикуется повышенная осевая нагрузка (вплоть до 31 тонн на ось) и усиленная конструкция железнодорожного пути, поскольку перевозка необогащенного сырья требует кратного повышения провозной способности. Применяются рельсы Р65 и Р75, кроме того есть случаи применения усиленных стальных шпал.

Также обычно максимальная скорость следования технологических поездов гораздо ниже скоростей поездов на магистралях общего пользования, что позволяет уменьшить динамическое воздействие на путь тяжеловесного подвижного состава в следствие галопирования и поперечного раскачивания кузовов вагонов, что может вызвать сход с рельсов, особенно в кривых участках пути.

Тяговый подвижной состав на карьерных железных дорогах, как и на общей сети, представлен тремя видами локомотивной тяги – тепловозной, электровозной постоянного тока и переменного тока. Отличием электровозной тяги рудных ходов является стандарт напряжения в контактной сети: на сетях постоянного тока поддерживается напряжение 1,5 кВ, на сетях переменного тока – 10 кВ. На данном виде железнодорожного транспорта имеется множество отклонений от установленных стандартов сети общего пользования, обусловленных местными техническими условиями. Таким образом в практике некоторых ППЖТ имеется электрификация линий постоянным током 1 кВ, 750 В, 550 В, 250 В.

С целью увеличения надежности карьерного железнодорожного транспорта и его провозных способностей, в 1960–80 гг. производилось множество экспериментов с модернизацией локомотивной тяги на карьерных сетях. Одним из самых удачных решений можно назвать

двухсистемную дизель-электрическую тягу (изобретение теплоэлектровоза, способного двигаться, питаясь от контактной сети и, при необходимости переходить в режим тепловозной тяги на неэлектрифицированных участках), а также применение распределенной тяги на технологических поездах (изобретение тягового агрегата) [7]. Тяговый агрегат, управляемый по системе многих единиц – это головной электровоз или теплоэлектровоз и один или несколько моторных думпкаров. Моторный думпкар – грузовой вагон, оборудованный тяговыми электродвигателями, питающимися энергией от ведущей тяговой секции. Распределенная тяга на рудных ходах позволяет оптимизировать размеры движения поездов за счет значительного увеличения их массы. Впервые в истории СССР тяговый агрегат был создан в 1957 году на Коркинском угольном разрезе. Обычный карьерный электровоз IV-КП и моторный думпкар, оборудованный на основе серийного вагона, были приспособлены для совместной работы по системе многих единиц. Результаты смелого эксперимента были более чем удачные – сцепной вес локомотива увеличился вдвое, при этом сохранилась суммарная грузоподъемность состава. В последующем тяговые агрегаты стали выпускаться серийно на локомотивных заводах и получили широкое распространение на железных дорогах ГОКов, угольных разрезов и других карьерных ПШЖТ.

В последние годы идея гибридных приводов для всех видов транспорта реализуется в целом ряде новых сочетаний – электродвигателей, двигателей внутреннего сгорания, дизелей, газотурбинных установок, водородных топливных элементов и аккумуляторных батарей повышенной емкости. Все эти новшества должны быть использованы для кардинального повышения эффективности карьерного тягового подвижного состава.

Кабина машиниста у большинства поездных формирований одна, находится на ведущей электровозной секции, имеет обзор в обе стороны, чтобы позволить локомотивной бригаде управлять поездом как при езде локомотивом вперед, так и при подталкивании состава. Следование технологического поезда без обгона локомотива на конечных станциях позволяет сократить время в местах погрузки и выгрузки. Для безопасности движения поезда вагонами вперед хвостовой вагон оборудуется громким звуковым и ярким световым сигналом постоянного действия, а также в редких случаях камерами заднего вида, позволяющими локомотивной бригаде следить за «мертвыми» зонами, вызываемыми кузовами вагонов или локомотива.

С тяговыми агрегатами формируется состав из немоторных думпкаров, обеспечивающий потребности промышленного предприятия в провозных способностях и сырье (так называемая «вертушка»), как правило, он состоит из 10–15 шестиосных думпкаров 2ВС-105. Состав

думпкаров формируется на большой срок работы, расцепка производится только для смены локомотива или при необходимости отцепочного ремонта одного или нескольких вагонов.

Токосъем у промышленных электровозов и электровозных секций осуществляется как с классического пантографа через контактную сеть верхнего токосъема, так и через боковую контактную сеть специальным боковым токоприемником. Боковая контактная сеть обустраивается в местах погрузки сырья, чтобы бульдозер в процессе погрузки состава не задел ковшом контактную сеть.

В числе технологических особенностей карьерных перевозок необходимо отметить следование технологических поездов из карьера на комбинат на подъем груженными, а на спуск из комбината обратно в карьер порожними. Загрузка моторных думпкаров позволяет использовать массу груза для увеличения осевого давления и как следствие силы сцепления колеса с рельсом, что позволяет упростить подъем технологического поезда в гору и обеспечивает возможность проектировать руководящий уклон очень большим, вплоть до 60 %, в зависимости от требуемых провозных способностей, массы поезда и мощности локомотива. При обратном следовании происходит спуск поезда в порожнем состоянии, большая сила сцепления с рельсом при этом не требуется.

Кроме технологических поездов, вне зависимости от вида их тяги, ППЖТ используются маневровые тепловозы для завоза и вывоза грузовых вагонов с территории предприятия на общую сеть, а также для транспортировки по рудным ходам рельсоукладчика – пожалуй, самого важного рабочего поезда на любом карьере, ведь часть карьерных путей из-за выработки породы и регулярного изменения рельефа нуждается в очень частой перекладке. Такие участки пути называют временными путями или «усами».

Для обслуживания контактной сети на электрифицированных сетях применяются электромонтажные автотрисы семейства АДМ.

РАЗДЕЛЬНЫЕ ПУНКТЫ РУДНЫХ ХОДОВ

Можно выделить следующие основные типы раздельных пунктов карьерных железных дорог.

Станция выгрузки (Рис. 1) предназначена для приема и отправления технологических поездов, их оборота, производства выгрузки думпкаров. На станции располагается бункер для приема руды, обычно в здании. Выгрузка может производиться со всех путей станции или с части путей, если бункеры оборудованы не при каждом пути станции. Благодаря возможности оборота поездов без обгона локомотива, такие станции часто строятся конечными тупикового типа. Ввиду ограниченности длины станционных площадок в пунктах приема руды на станциях выгрузки

целесообразно применять стрелочные переводы специальных конструкций [8, 9].

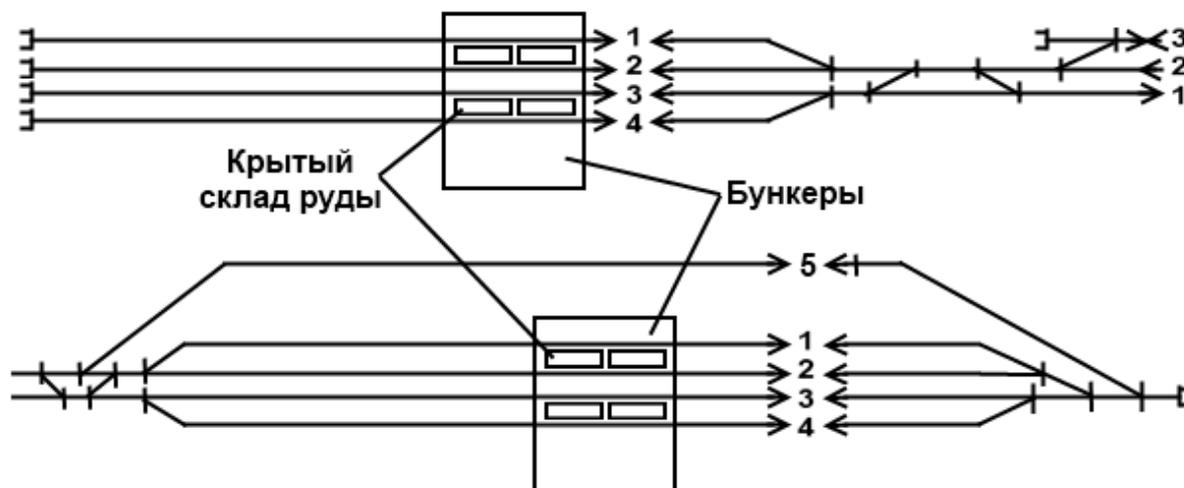


Рис. 1. Примеры схем выгрузочных станций рудного хода тупикового и сквозного типа

Локомотиво-вагонное депо – предназначено для отстоя и ремонта промышленных локомотивов и вагонов технологических поездов, как правило, появляется позже первой очереди строительства ППЖТ, на определенной стадии развития совмещенное депо передается под ремонт только вагонов, а на новой территории строится отдельное депо, специализирующееся на ремонте локомотивов. Большинство путей заходят в крытый ангар депо (Рис. 2). Станция зачастую тупикового типа.

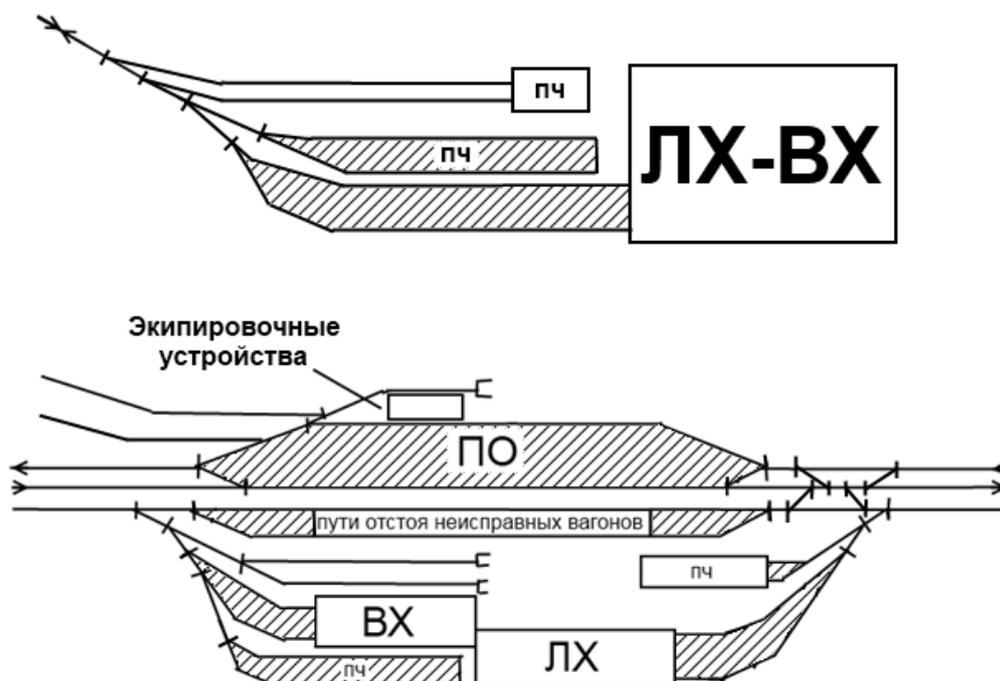


Рис. 2. Примеры схем локомотивно-вагонных депо

Промежуточная станция (обгонный пункт) (Рис. 3) служит для стоянки и обгона попутных технологических поездов, перехода с одного главного пути на другой в случае невозможности организации движения по двухпутной линии.

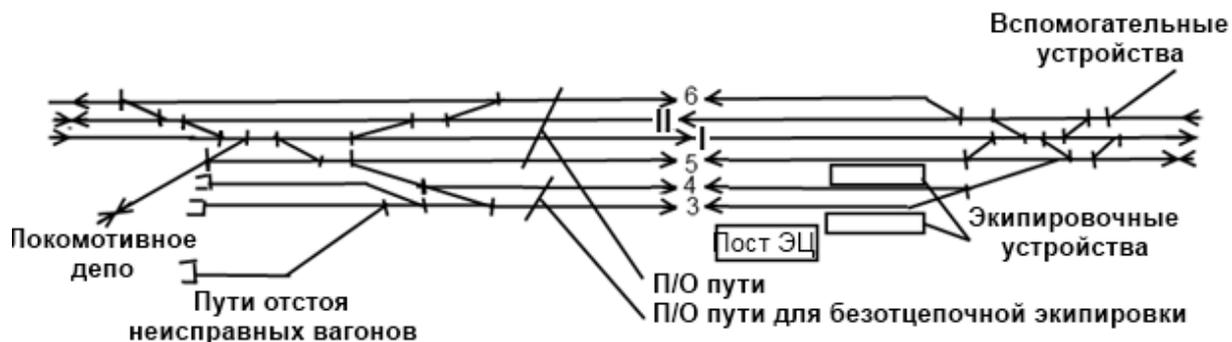


Рис. 3. Промежуточная станция рудного хода

Узловая станция (Рис. 4) – понятие немного отличается от принятого на железнодорожной сети общего пользования. На железнодорожных сетях карьерных железных дорог узловая станция призвана разделить ход специализированной железнодорожной линии на главное и второстепенное направления. Например, это делается для следования поездов под погрузку в два разных карьера. Также к узловой станции может примыкать соединительная линия от локомотивного депо, в таком случае на узловой станции обустраиваются экипировочные устройства, для удобства безотцепочной экипировки локомотива, а также экипировки локомотивов, вышедших из локомотивного депо.

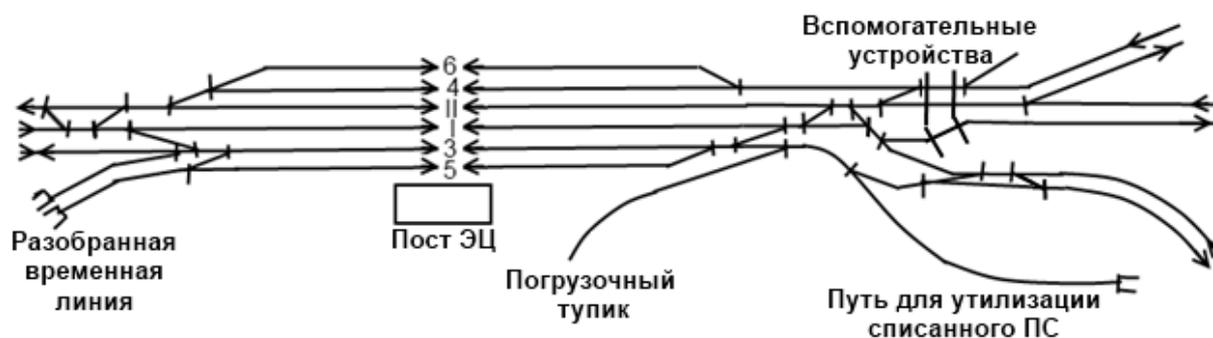


Рис. 4. Пример схемы узловой станции рудного хода

Пост примыкания (Рис. 5) служит для соединения двух линий карьерной железнодорожных при отсутствии необходимости строительства станции. Обустраивается в местах соединения линий с малыми поездопотоками, а также в местах примыкания погрузочных путей с незначительными размерами движения заходящих под погрузку поездов.

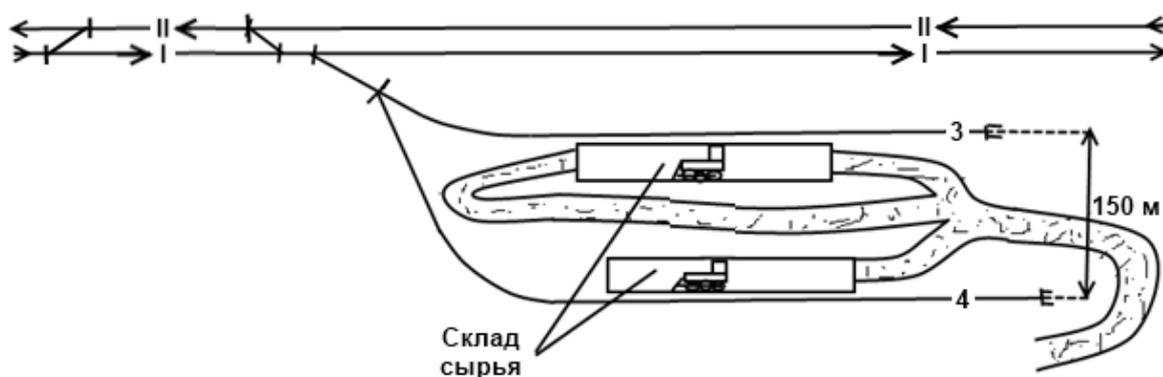


Рис. 5. Пример устройства поста примыкания

Станция погрузки (Рис. 6) предназначена для погрузки технологических поездов, размещения временных складов сырья, погрузочных устройств (карьерных экскаваторов). В случае, если забой находится на некотором удалении от погрузочной станции или вне зоны доступа железнодорожного транспорта, например, по причине крутых спусков, сырье доставляется до места погрузки в технологический поезд карьерными самосвалами, для этого на местах погрузки устраиваются карьерные автомобильные дороги, места разгрузки карьерных самосвалов [10]. Станция, как правило, тупикового типа, погрузочные тупики оборудуются боковой контактной сетью для удобства погрузки сырья в вагоны технологического поезда. Эти тупики являются временными путями и по мере выработки карьера могут перекладываться рельсоукладочным поездом на новое место погрузки.



Рис. 6. Схема погрузочной станции

На основе этих типов отдельных пунктов устраивается сеть карьерной железной дороги, которая может иметь разную структуру в зависимости от географических особенностей местности [11]:

- полукольцевая или кольцевая структура (Рис. 7) образуется при условии, что карьер находится в непосредственной близости от ГОКа и железнодорожной линии общего пользования. Ее особенностью является сквозной тип главной станции комбината, две и более линии, заходящие в карьер через несколько входных траншей с двух противоположных сторон. Образуется своеобразный «полумесяц»;

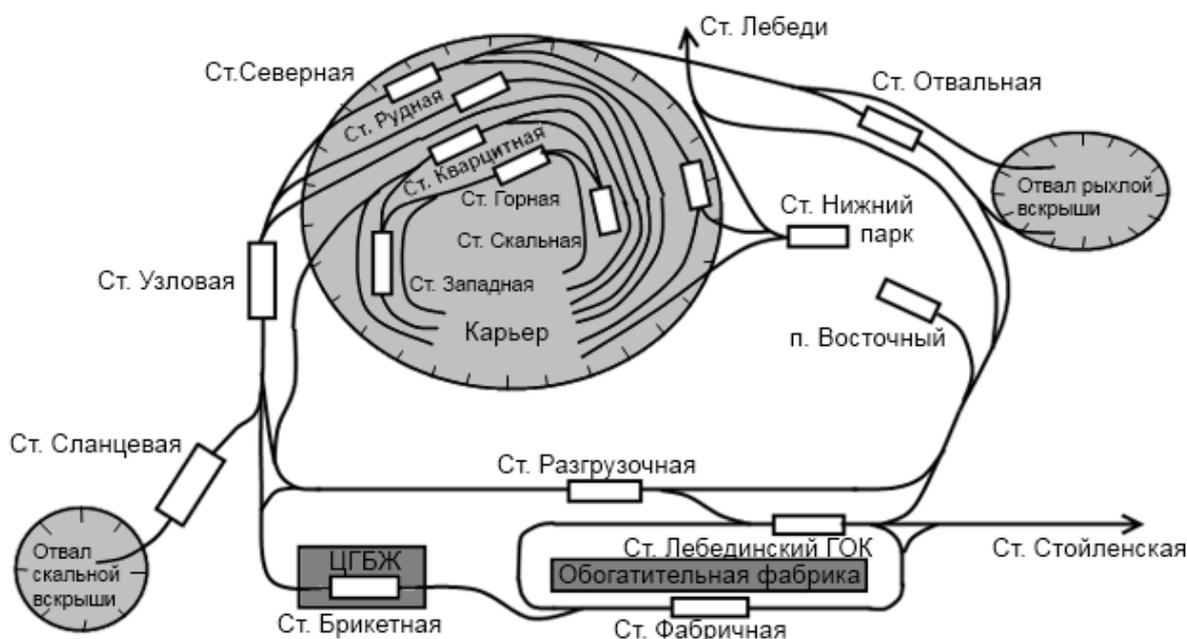


Рис. 7. Пример кольцевой структуры карьерной железной дороги

- линейная структура (Рис. 8) – карьер находится на небольшом удалении от ГОКа, рядом с которым проходит железнодорожная линия общего пользования. Главная станция проектируется сквозной, из одной горловины осуществляется выход на сеть общего пользования, из другой начинается протяженная (порядка 30–50 км) линия технологического железнодорожного транспорта, направленная в карьер;

- комбинированная структура – по мере выработки старых карьеров и открытия новых сеть ППЖТ может переходить из кольцевой и линейной структуры в комбинированную, на которой характерно полукольцевое расположение главной станции у главного карьера и линейные направления к второстепенным карьерам.

ОСОБЕННОСТИ ГРУЗОВОЙ РАБОТЫ

Технологический железнодорожный транспорт горнообогатительных комбинатов совмещает в себе черты полноценного железнодорожного транспорта и транспортирующего комплекса устройств циклического типа. Технологические поезда следуют со станции выгрузки в карьер, погружаются, возвращаются на место выгрузки и выгружаются.

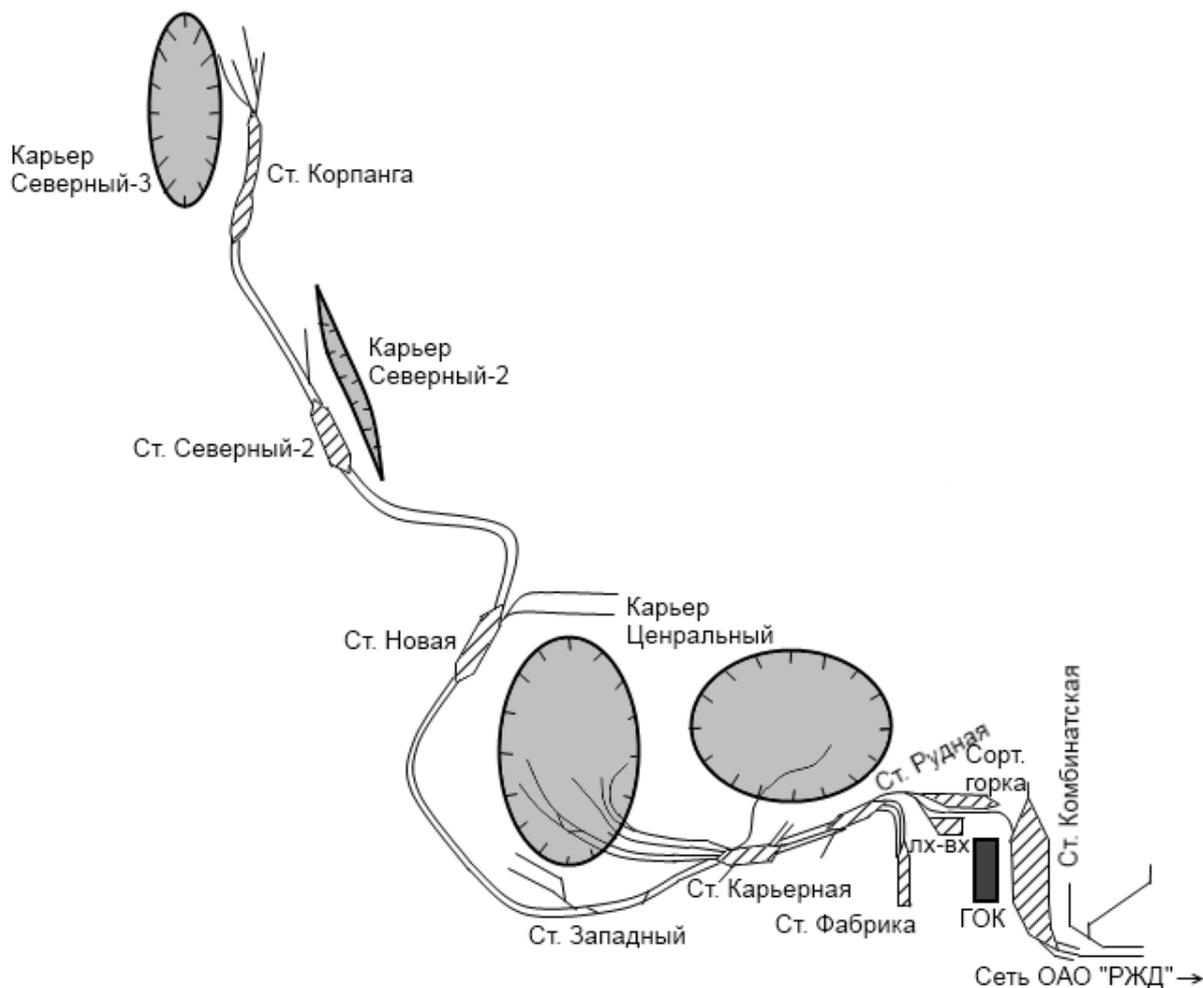


Рис. 8. Пример линейной структуры карьерной железной дороги

Их цикл работы представляет собой аналог технологического маршрутного поезда на общей сети железных дорог – поезд следует одним и тем же неизменным составом между двумя конечными станциями, переформирование состава в пути следования является отклонением от нормального рабочего процесса и может быть обусловлено необходимостью отцепочного ремонта одной из единиц подвижного состава.

Технологические поезда почти в 100 % случаев поднимаются из карьера к комбинату в полностью загруженном состоянии, а спускаются в полностью порожнем, лишь в редких случаях подвозя сотрудников карьера на место работы в кабине электровоза управления. В связи с этим можно выявить в качестве полезного элемента циклического процесса движение из карьера на комбинат. Остальные элементы являются вынужденными, необходимыми для завершения цикла работы технологического поезда. Время и трудоемкость погрузки, выгрузки и следования в карьер

целесообразно сокращать. Для сокращения времени спуска поезда в карьер применяют увеличение скорости движения поезда, благодаря порожнему состоянию поезда (и как следствие низкой статической и динамической нагрузке) это позволяет без угрозы безопасности движения сократить время хода поезда по линии с комбината в карьер. Для ускорения погрузки поезда может применяться кратное увеличение числа фронтальных погрузчиков или увеличение их грузоподъемности, однако на практике последний способ ускорения погрузки применяется намного реже.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Сырьевой сектор промышленности постсоветского пространства не только сохраняет, но и наращивает объемы производства. Большие мощности потребителей металлургической продукции, минеральных удобрений, химической продукции, строительных материалов вызывают необходимость наращивания темпов производства готовой продукции на горнообогатительных комбинатах, это напрямую сказывается на требуемой провозной способности карьерных железных дорог.

Несмотря на достаточно большую суммарную грузоподъемность технологического поезда (около 1200 тонн сырья), для обеспечения ГОКа необходимым количеством руды требуется довольно большой парк локомотивов и технологических составов, а также достаточно плотный нормативный график движения поездов. Технологические поезда следуют в карьер с интервалом от 5 до 15 минут. Для обеспечения бесперебойности такого интенсивного движения требуется подбор высококвалифицированных профессиональных кадров для службы движения. Выделяется отдельный диспетчерский круг для управления движением на технологических линиях ППЖТ. Важными качествами для сотрудников службы движения являются внимание, скорость реакции на поступающую информацию, правильность и незамедлительность выполнения и передачи управленческих решений. Также стоит отметить важность профессионализма сотрудников локомотивных бригад, поскольку движение по затяжным спускам и подъемам, особенно с такими крутыми уклонами как на сетях технологических сетей ГОКов (40–60 %) требует особого внимания и навыков управления поездом.

Снизить влияние человеческого фактора на уровень безопасности и надежности технологических перевозок возможно за счет разработки специальных средств автоматизации управления движением поездов, учитывающих специфику этого вида транспорта [12–14].

Об эксплуатационной работе промышленного железнодорожного транспорта можно привести некоторую статистику на примере ППЖТ Лебединского ГОКа [15].

Каждый состав состоит из тягового агрегата (обычно с двумя моторными думпкарами) и нескольких немоторных думпкаров, количество которых зависит от назначения поезда. На вывозе скальной вскрыши и кварцита используются составы, в которые входит 10–11 думпкаров, а на вывозе рыхлой вскрыши вертушки насчитывают 10–13 думпкаров.

Каждая вертушка за сутки совершает порядка 7 рейсов, откатывая за один рейс из карьера примерно 1 200 тонн горной массы.

Теперь можно оценить масштабы движения: ежедневно 44 поезда 308 раз спускаются в карьер и возвращаются из него, чтобы вывести кварцит и пустую породу. То есть, каждые 5 минут в карьер и из карьера проходит одна пара поездов.

Учитывая, что от главной станции в карьер следуют две линии, фактический интервал движения поездов может отличаться от среднего расчетного, поскольку может осуществляться одновременное движение поездов по двум линиям. Кроме того, при разделении технологической линии на две разные станции погрузки размеры движения на каждом из ответвлений уменьшаются, а значит и возрастает фактический интервал между поездами.

Вышеуказанные 44 тяговых агрегата Управления железнодорожного транспорта Лебединского ГОКа за год вывозят из карьера 90 млн. тонн вскрыши и горной породы – это примерно 2 млн. тонн на один агрегат. 15 тепловозов за этот же период обеспечивают отгрузку потребителям около 15 миллионов тонн продукции комбината – 1 млн. тонн на один локомотив. Достичь подобных объемов было бы невозможно без четкой организации процесса перевозок и слаженной работы полуторатысячного коллектива Лебединских железнодорожников, на каждого из которых приходится более 8 тонн перевозимых грузов в час.

Не стоит забывать, что одновременно с круглосуточным движением технологических поездов необходимо успевать пропускать по линиям обслуживающие поезда, такие как рельсоукладочный поезд, электромонтажные автотрисы и прочую спецтехнику для обслуживания инфраструктуры рудного хода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карьерные железные дороги России представляют собой высокотехнологичный сегмент транспорта, созданный на базе передовых оригинальных разработок транспортной науки и техники прошлого века. На современном этапе для сохранения и увеличения эффективности и безопасности рудных перевозок необходимо широко внедрять на ППЖТ инновационный тяговый подвижной состав, комбинирующий различные энергетические источники – контактную сеть постоянного и переменного тока, аккумуляторные батареи большой мощности, топливные элементы и

т.д. В системе организации движения поездов для снижения роли человеческого фактора широкое применение должны найти новые системы железнодорожной автоматики на основе машинного зрения, удаленного управления и интервального регулирования по радиоканалу, автоведения поездов, автоматизированного управления стрелками и сигналами.

В свою очередь накопленный опыт технологического железнодорожного транспорта коллег-промышленников полезно принять к сведению и применить его на развивающемся направлении рынка грузовых железнодорожных перевозок – перевозках по специализированным грузовым магистралям, в первую очередь на восточном полигоне ОАО «РЖД».

Более тесное сотрудничество и взаимодействие позволит получить большую экономическую выгоду от транспортного процесса, а также повысить его производительность.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Кукушкин А.И. Роль промышленного железнодорожного транспорта в экономике России // Транспортная стратегия – XXI век. – 2018. – № 40. – С. 72–74. [Kukushkin AI. Rol' promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta v jekonomike Rossii. *Transportnaja strategija – XXI vek*. 2018;(40):72-74 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: http://www.sovstrat.ru/files/TS40_2018.pdf
2. Числов О.Н., Ручкин И.В. Мероприятия по сокращению непроизводительных простоев вагонов на предприятиях промышленного железнодорожного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 7. – С. 27–32. [Chislov ON, Ruchkin IV. Measures aimed at reducing unproductive wagon downtime on the industrial railway transport enterprises. *Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*. 2020;(7):27-32. (In Russ.)]. doi: 10.36535/0236-1914-2020-07-5
3. Давыдов Г.Е. Промышленный транспорт и его наука // Бюллетень транспортной информации. – 2020. – № 2(296). – С. 7–12. [Davydov GE. Industrial transport and its science. *Bulletin of transport information*. 2020;2(296):7-12. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://natrans.ru/art-text.asp?artnum=2406>
4. СП 261.1325800.2016. Железнодорожный путь промышленного транспорта. Правила проектирования и строительства. [SP 261.1325800.2016 Industrial railroad. Rules of engineering and construction. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/456042945>
5. СП 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм. Свод правил. [SP 119.13330.2017 Railways with 1520 mm track. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/550965737>
6. Шульгина Д.Э. Транспорт для доставки угля в промышленных узлах // Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития», Ростов-на-Дону,

- 03–04 февраля 2020 года. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 364–367. [Shulgina DE. Transport for the delivery of coal in the industrial nodes. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Transport i logistika: prostranstvenno-tehnologicheskaja sinergija razvitija". 2020 Februar 03–04, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: RSTU; 2020. pp. 364-367. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://www.rgups.ru/science/doktorantura-i-aspirantura-kon-1388>
7. Браташ В.А. Научные основы проектирования, создание унифицированного ряда тяговых агрегатов и разработка перспективных типов подвижного состава для железнодорожного транспорта открытых горных разработок: автореферат дисс. ... док. техн. наук. – Днепропетровск, 1992. – 86 с. [Bratash VA. Nauchnye osnovy proektirovanija, sozdanie unificirovannogo rjada tjagovyh agregatov i razrabotka perspektivnyh tipov podvizhnogo sostava dlja zheleznodorozhnogo transporta otkrytyh gornyh razrabotok [dissertation]. Dnepropetrovsk; 1992. – 86 с. (In Russ.)]. Доступно по: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000058017?page=8&rotate=0&theme=white> Ссылка активна на: 11.12.2022.
 8. Говоров В.В., Басовский Д.А. Оптимизация конструкций стрелочных переводов железных дорог промышленного транспорта // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 25–27 ноября 2020 года. – Красноярск: ИрГУПС, 2020. – Т.2. – С. 91–94. [Govorov VV, Basovsky DA. Optimizacija konstrukcij strelochnyh perevodov zheleznyh dorog promyshlennogo transporta. Proceedings of the XXIV National Scientific and Practical Conference "Innovacionnye tehnologii na zheleznodorozhnom transporte". 2020 Nov 25-27; Krasnojarsk: IrGUPS. 2020;2;91-94. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: https://www.irgups.ru/sites/default/files/krizht/science/Scientific%20publications/sbornik_t2.pdf
 9. Говоров В.В., Басовский Д.А. К вопросу о совершенствовании конструкций соединений путей дорог необщего пользования // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 437–442. [Govorov VV, Basovsky DA. K voprosu o sovershenstvovanii konstrukcij soedinenij putej dorog neobshhego pol'zovanija. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2018;1;437-442. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.irgups.ru/science/konferencii/TISR/arkhiv-tistr/2017> Ссылка активна на: 11.12.2022.
 10. Тарасов П.И., Хазин М.Л., Голубев О.В. Эволюция карьерного автотранспорта // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (50). – С. 67–74. [Tarasov PI, Khazin ML, Golubev OV. The evolution of quarry vehicles. *Herald of the Ural state university of railway transport*. 2021;2(50);67-74. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2079-0392-2021-2-67-74
 11. Информационный некоммерческий ресурс «Строительство, ремонт, недвижимость, дизайн». Совершенствование транспортных коммуникаций, увеличение скоростей движения и оборачиваемости транспортных средств. [Informacionnyj nekommercheskij resurs "Stroitel'stvo, remont, nedvizhimost', dizajn". Sovershenstvovanie transportnyh kommunikacij, uvelichenie skorostej dvizhenija i oborachivaemosti transportnyh sredstv. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://ctcmetar.ru/transport-glubokih-karero/8978-sovershenstvovanie-transportnyh-kommunikacij-uvelichenie-skorostey-dvizheniya-i-oborachivaemosti-transportnyh-sredstv.html>
 12. Маргарян С., Осьмов В., Усенко Д. Система радиуправления и контроля стрелочными переводами на базе узкополосных радиомодемов Viper-SC+ // Беспроводные технологии . – 2018. – № 2(51). – С. 48–52. [Margarjan S, Os'mov V,

- Usenko D. Sistema radioupravljenija i kontrolja strelochnymi perevodami na baze uzkopolosnyh radiomodemov Viper-SC+. *Wireless Technologies* 2018;2(51);48-52. (In Russ.]. Доступно по: <https://wireless-e.ru/magazine/wireless-2-2018>. Ссылка активна на: 11.12.2022.
13. Горелик А.В. Развитие систем автоматики на путях промышленного транспорта // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 13. – № 13 (13). – С. 85–88. [Gorelik AV. Razvitie sistem avtomatiki na putjah promyshlennogo transporta. *Vnedrenie sovremennyh konstrukcij i peredovyh tehnologij v putevoe hozhajstvo*. 2018;13(13);85-88. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36589822>
14. Мащенко П.Е., Шутилов К.В. Анализ сенсоров систем технического зрения для нужд промышленного железнодорожного транспорта // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2021. – № 1 (53). – С. 40–45. [Mashchenko PE, Shutilov KV. Analysis of sensors of vision systems for the needs of industrial railway transport. *Railway Equipment*. 2021;1(53);40-45. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45597436>
15. Канал «Заводы и тепловозы». Как работает железная дорога Лебединского ГОКа. [kanal «Zavody i teplovozy». Как rabotaet zheleznaia doroga Lebedinskogo GOKa. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 11.12.2022. Доступно по: <https://zen.yandex.ru/media/b282/kak-rabotaet-jeleznaia-doroga-lebedinskogo-goka-5bb4fa56049c1c00aa162763>

Сведения об авторах:

Костенко Владимир Васильевич, к.т.н., доцент;
eLibrary SPIN: 2550-5115; ORSID: 0000-0002-7535-2540; Scopus ID: 57430957100;
e-mail: docentkostenko@yandex.ru

Коробов Денис Сергеевич, инженер путей сообщения;
e-mail: denis-korobov-98@mail.ru

Information about the authors:

Kostenko Vladimir, PhD in Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 2550-5115; ORSID: 0000-0002-7535-2540; Scopus ID: 57430957100;
e-mail: docentkostenko@yandex.ru

Korobov Denis, railway engineer;
e-mail: denis-korobov-98@mail.ru

Цитировать:

Костенко В.В., Коробов Д.С. Техничко-технологические особенности карьерных железных дорог // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 31–45. doi: 10.17816/transsyst20228431-45

To cite this article:

Kostenko VV, Korobov DS. Technical and technological features of quarry railways. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):31-45. doi: 10.17816/transsyst20228431-45

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

УДК [UDC] 538.955

DOI 10.17816/transsyst20228446-57

© **И.В. Мартиросян, М.А. Осипов, А.С. Стариковский,
С.В. Покровский, И.А. Руднев**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТСП СБОРОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Цель: анализ влияния условий охлаждения высокотемпературных сверхпроводящих элементов на силовые характеристики магнитолевитационной системы в условиях быстроменяющихся магнитных полей

Методы: численный мультифизический анализ магнитолевитационной системы выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

Результаты: при быстрых, более чем 5 Тл/с, скоростях изменения магнитного поля, обусловленных движением сверхпроводника в магнитном поле с неоднородным локальным распределением, преимущественным способом охлаждения является использование криокулерной техники. При скоростях изменения магнитного поля менее 5 Тл/с допустимо использование в качестве охладителя жидкого азота.

Заключение: разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические характеристики левитационных систем различного масштаба и может быть применена для бесконтактного транспорта, а также во вращающихся машинах, в том числе кинетических накопителях энергии.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, магнитная левитация, транспортные системы, метод конечных элементов.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© **I.V. Martirosian, M.A. Osipov, A.S. Starikovskii, S.V. Pokrovskii,
I.A. Rudnev**

National research nuclear university MEPhI
(Moscow, Russia)

INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS OF HTS ASSEMBLY ON THE CHARACTERISTICS OF A MOVING MAGLEV SYSTEM

Background: analysis of the influence of cooling conditions of high-temperature superconducting elements on the power characteristics of a maglev system under conditions of rapidly changing magnetic fields.

Aim: analysis of the influence of cooling conditions of high-temperature superconducting elements on the force characteristics of a maglev transport platform under conditions of rapidly changing magnetic fields caused by the inhomogeneity of the magnetic track.

Methods: numerical analysis of the maglev system was performed by the finite element method in the Comsol Multiphysics engineering simulation software.

Results: at fast, more than 5 T/s, magnetic field change rates, due to the motion of the superconductor in a magnetic field with a non-uniform local distribution, the preferred method of cooling is the use of cryocooler technology. At rates of change of the magnetic field less than 5 T/s, it is permissible to use liquid nitrogen as a cooler.

Conclusion: The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic characteristics of levitation systems of various scales and can be applied to contactless transport, as well as in rotating machines, including kinetic energy storage devices.

Key words: high-temperature superconductor, maglev, transport systems, finite element method.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные системы на основе левитационных технологий имеют значительные перспективы практического применения в реальных транспортных системах, а также вращающихся машинах, кинетических накопителях энергии. Один из способов реализации магнитного подвеса представляет собой применение пары сверхпроводник – постоянный магнит, в которой взаимное отталкивание элементов пары и, как следствие, бесконтактное движение, реализуются за счет эффекта Мейсснера-Оксенфельда. Особенно с этой точки зрения привлекательны так называемые высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние превышающей температуру кипения жидкого азота, что делает возможным использование этого дешевого хладагента для охлаждения ВТСП элементов. Вопросами создания магнитолевитационного транспорта активно занимаются в ряде научных лабораторий и университетов как мира, так и России [1–6]. В ранних исследованиях в качестве ВТСП элементов применялись объемные сверхпроводники, однако в последнее время для создания магнитолевитационных систем все больше внимания уделяется альтернативным подходам, основанным на использовании различных наборов (или стопок) ленточных ВТСП композитов [7, 8]. Ленточные ВТСП композиты имеют слоистую структуру, содержащую прочную металлическую подложку, слой сверхпроводника, а также слои меди и серебра с хорошей теплопроводностью [9]. ВТСП-ленты могут быть сложены в стопки, имеющие высокую термическую и механическую

стабильность, а левитационные характеристики стопок лент сопоставимы и с объемными ВТСП, а в ряде случаев превосходят их [10–13]. Физические и механические свойства, а также высокая коммерческая доступность, в настоящее время делают стопки ВТСП лент привлекательной альтернативой объемным сверхпроводникам в левитационных системах.

При рассмотрении возможности создания магнитолевитационного транспорта необходимо учитывать тот факт, что функционирование ВТСП элементов будет происходить в динамических условиях разгона, движения и торможения [14]. В частности, одной из проблем при движении ВТСП элементов является перемагничивание сверхпроводника, которое вызвано неизбежной локальной неоднородностью магнитного трека, связанного, например, с неоднородностью намагниченности постоянных магнитов или несовершенством их укладки в опорном магнитном треке. В таких случаях скорость изменения магнитного поля может превышать 100 Тл/с, когда расстояние между магнитами с сверхпроводящими элементами изменяется даже на относительно небольшие величины в сильных магнитных полях за короткое время. Еще более высокие скорости изменения магнитного поля могут быть достигнуты в движущихся левитационных подвесах из-за неоднородности магнитной дорожки. Действительно, магнитная неоднородность всего в 0,1 Тл на высоте 1 см над магнитным рельсом приводит к скорости изменения магнитного поля более 1000 Тл/с при разгоне тележки всего лишь в 100 км/ч. Перемагничивание сверхпроводника приводит к выделению энергии, что, в свою очередь, при недостаточном теплоотводе может вызвать рост температуры сверхпроводника, понижение его критического тока и потерю магнитолевитационных характеристик. Таким образом, в динамических режимах функционирования, актуальным становится вопрос как о способах охлаждения сверхпроводящего элемента, так и о способах отвода выделяющегося в нем тепла. Охлаждение сверхпроводника может осуществляться двумя способами: с помощью криокулера и жидким хладагентом (как правило, жидким азотом). В работе [15] были рассмотрены различные аспекты криокулерного охлаждения. В настоящей статье мы проводим сравнение эффективности криокулерного и азотного охлаждения стопок ВТСП лент как элементов транспортной магнитолевитационной системы в различных динамических условиях изменения магнитного поля.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВТСП ЭЛЕМЕНТА

В рамках представленной работы рассмотрены две системы охлаждения намагничиваемой в поле постоянного магнита стопки ВТСП

лент: криокулерное охлаждение и охлаждение жидким азотом. При использовании криокулера охлаждение происходит, как правило, с одной стороны стопки, примыкающей к холодной головке криокулера. В случае использования жидкого азота охлаждение осуществляется по всему периметру стопки, помещенной в жидкий азот. Базовая геометрия криоохлаждаемой системы левитации показана на Рис. 1А. В этом случае слоистая стопка ВТСП-лент (Рис. 1Б) располагается в горизонтальной плоскости xy и размещается на медной головке криокулера. Постоянный магнит, распределение магнитного поля которого показано на Рис. 1С, перемещается вдоль вертикальной оси z . При намагничивании магнит приближается к стопке ВТСП лент с расстояния 30 см до высоты 7 мм над поверхностью стопки, а затем вновь отдаляется от нее на то же расстояние. Таким образом имитируется режим охлаждения в нулевом поле (zero field cooling – ZFC). Намагничивание стопки ВТСП лент выполняется при температуре 77,4 К для обоих вариантов охлаждения (криокулер, жидкий азот). Скорость ввода магнитного поля при намагничивании варьировалась от 0,05 до 30 Тл/с посредством изменения времени подвода и отвода постоянного магнита. На практике такие условия могут быть реализованы либо при сильных скачках магнитного поля, либо при импульсном намагничивании стопки лент.

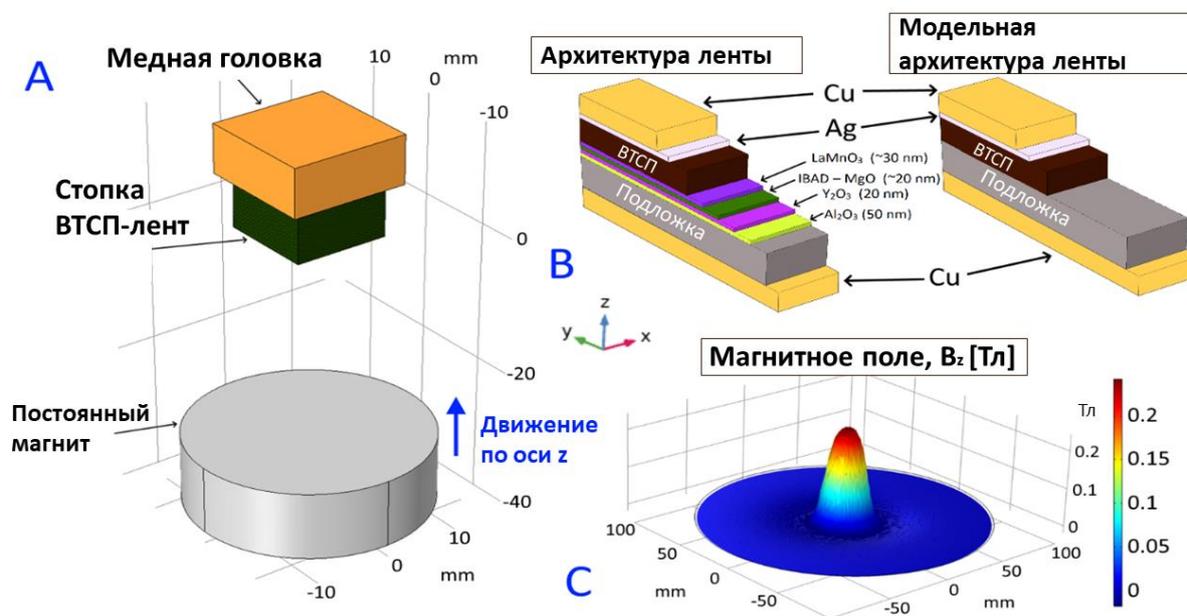


Рис. 1. Система охлаждения ВТСП эксперимента

А – конфигурация системы левитации;

В – реальная и модельная ленточные архитектуры;

С – распределение поля постоянного магнита на высоте 7 мм над его поверхностью

В качестве образцов ВТСП лент рассматривались композитные структуры, которые в рамках модели содержат ВТСП слой, слой подложки, меди и серебра (Рис. 1В). В качестве прототипов моделируемых лент выступали промышленные ВТСП ленты фирм SuperOx и Sunam, основные характеристики которых представлены в Табл. 1. Подробная спецификация характеристик ВТСП лент представлена на сайте производителя для лент SuperOx [16] и Sunam [17].

Таблица 1. Характеристики ВТСП лент

Параметр	SuperOx	Sunam
Толщина сверхпроводящего слоя REBCO (где RE-редкоземельный элемент)	1–3 мкм	1–3 мкм
Подложка	Hastelloy C276 50 мкм	Non-magnetic SUS : 80 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм	1,5 мкм
Толщина медного слоя	30 мкм	20 мкм
Средний критический ток для ленты шириной 12 мм, А	550	850
Показатель степени ВАХ (используется при расчетах)	~27	~27

Максимальная высота стопки, рассмотренной в данной работе составляла 70 шт. лент. Критический ток ВТСП лент в рамках модели искусственно изменялся от 150 до 650 А. В качестве источника внешнего магнитного поля принимается Ne-Fe-B магнит диаметра 30 мм, высоты 10 мм с остаточной индукцией магнитного поля на поверхности 0,38 Тл.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

А. Электродинамическая модель

FEM (finite element model) модель магнитной левитационной системы была выполнена с использованием А-Н формализма, реализованного в программной среде Comsol Multiphysics. Данный формализм был успешно применен для расчета поведения ВТСП материалов, а также для расчета магнитных систем на их основе [14]. В этой постановке задачи прямой решатель среды Comsol Multiphysics использует две статических переменных: магнитное поле H и магнитный векторный потенциал A . Прямой решатель использует больше памяти, но при этом обладает большей точностью в сравнении с итерационным решателем.

Формулировка в терминах компонент магнитного поля (Н-формализм) применяется в ВТСП доменах для решения задачи о распределении плотности тока J в сверхпроводнике:

$$J = \nabla \times H \quad (1)$$

Управляющее уравнение для нестационарной задачи в случае Н-формализма представляет собой закон Фарадея:

$$\nabla \times E + \frac{dB}{dt} = \nabla \times E + \frac{d(\mu_0 H)}{dt} = 0 \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля, B – индукция магнитного поля, t – время, μ_0 – относительная магнитная проницаемость.

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

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (3)$$

где μ – магнитная проницаемость.

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

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

где E – напряженность электрического поля, ρ – сопротивление, E_c – критерий, равный 1 мкВ/см, J_c – плотность критического тока, n – показатель степени ВАХ. Плотность критического тока J_c автоматически вычисляется как частное критического тока и сечения ВТСП слоя ленты, размеры которого известны. Величина критического тока, так же, как и величина показателя степени n , являются одними из основных характеристик ВТСП материала и были представлены в Табл. 1. Распределение тока J вычисляется на основе закона Ампера (1) и применяется в выражении (4) для вычисления сопротивления сверхпроводника. Для других слоев ВТСП ленты используется линейная зависимость сопротивления от тока. В качестве граничных условий используется условие Дирихле.

В. Теплофизическая модель

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

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

где

d – плотность;

C_p – теплоемкость;

T – температура;

k – теплопроводность;

Q – все источники тепла, включая термоэлектрические;

u – поле скорости температур.

Плотности, теплоемкости и теплопроводности всех слоев ленты заложены в виде интерполяции экспериментальных данных [15]. 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.

В рамках модели криокулерная система охлаждения представляет собой массивную медную головку, мощность теплоотвода которой соответствует мощности реальной криокулерной системы охлаждения.

Тепловой анализ в случае охлаждения жидким азотом сводится к определению эффективного коэффициента теплоотдачи в хладагент, при этом численная модель учитывает гистерезисный характер кривой кипения жидкого азота, возможность многократной смены режимов кипения, наличие тепловой задержки начала пузырькового кипения [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Перейдем к рассмотрению влияния системы охлаждения на левитационные свойства стопок ВТСП-лент. На Рис. 2 приведены зависимости максимальной силы левитации от числа лент в стопке для криокулерного охлаждения до температуры 77,4 К и азотного охлаждения при скорости намагничивания 0,05 Тл/с. Видно, что при высоте стопки менее 30 шт. лент сила левитации при охлаждении обоими способами практически совпадает. При дальнейшем увеличении высоты стопки, слои, наиболее отдаленные от холодной головки криокулера начинают нагреваться сильнее, что отрицательно сказывается на захвате магнитного потока и силе левитации. С этой точки зрения азотное охлаждение, выполняемое по всему периметру стопки, при низкой скорости изменения магнитного поля и высоких критических токах оказывается выгоднее.

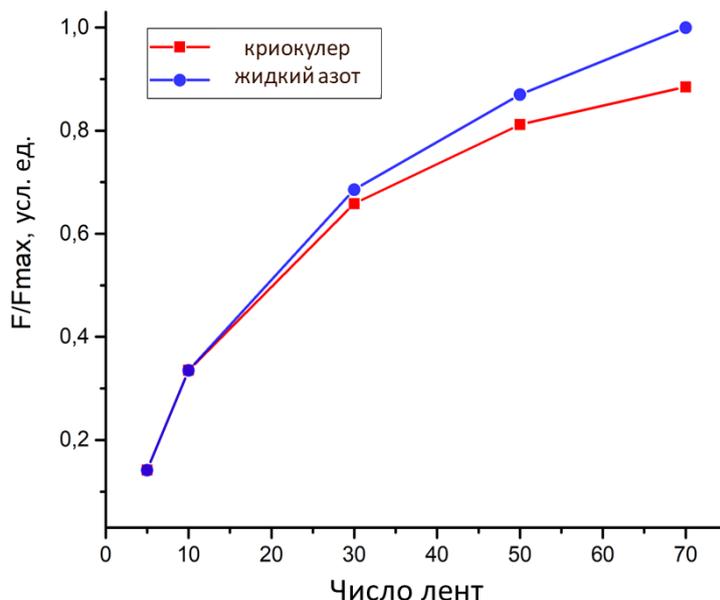


Рис. 2. Зависимости силы левитации от числа лент в стопке: скорость намагничивания – 0,05 Тл/с; критический ток лент – 300 А

Для того, чтобы объяснить низкую эффективность криокулерного охлаждения высоких (>30 лент) стопок было рассчитано распределение захваченного магнитного потока стопкой 50 ВТСП лент с различным критическим током при охлаждении криокулером до температуры 77,4 К (скорость ввода магнитного поля 0,05 Тл/с). Ввиду особенностей экранировки дальних слоев стопки ближними уже при температуре 77,4 К, стопки с более высоким критическим током не намагничены полностью. Это приводит к снижению эффективности захвата магнитного потока и уменьшению силы левитации при увеличении числа лент в стопке.

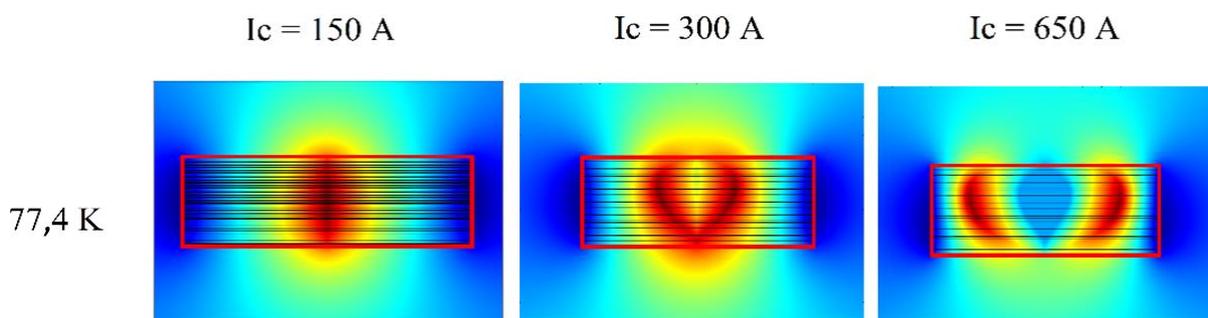


Рис. 3. Распределение захваченного магнитного потока стопками 50 ВТСП лент с различным инженерным критическим током при охлаждении криокулером до температуры 77,4 К: скорость намагничивания 0,05 Тл/с; холодная головка криокулера расположена сверху в соответствии с Рис. 1А

Однако для более высоких скоростей намагничивания, избыточное тепловыделение приводит к вскипанию жидкого азота и снижению

эффективности охлаждения из-за так называемого кризиса кипения (теплопроводность пара значительно уступает теплопроводности жидкости). Поэтому при намагничивании со скоростью более 5 Тл/с криокулерное охлаждение приводит к большей левитационной силе в сравнении с азотным охлаждением (Рис. 4). Причем чем меньше ВТСП лент в стопке, тем больше выигрыш в силе левитации при криокулерном охлаждении. Результаты численного анализа показали, что охлаждение жидким азотом является эффективным лишь для таких скоростей ввода поля, при которых изменение температуры в системе не превышает 3 К. Как только температура в системе начинает изменяться сильнее, процессы интенсивного кипения хладагента и многократной смены режимов его кипения приводят к снижению эффективности теплопередачи в окружающий тепловой резервуар. В случае охлаждения системы криокулером до температуры 77,4 К, сила левитации такая же, как для азотного охлаждения при скорости ввода поля менее 5 Тл/с и высоте стопки менее 30 шт. лент. Как только скорость ввода магнитного поля становится выше, сила левитации при азотном охлаждении становится ниже, поскольку прирост температуры в системе превышает 3 К и теплоотвода при помощи жидкого азота становится недостаточно для эффективного охлаждения.

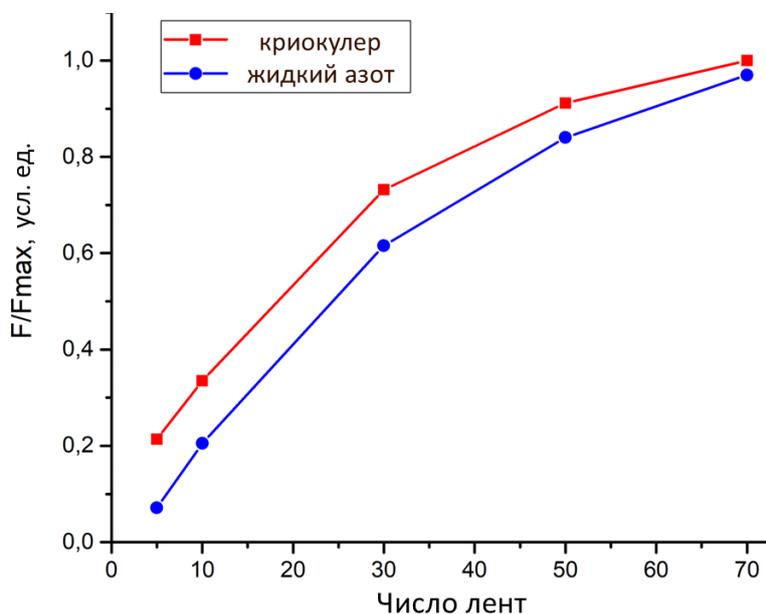


Рис. 4. Зависимости силы левитации от числа лент в стопке при криокулерном и азотном охлаждении: скорость намагничивания – 5 Т/с; критический ток лент – 300 А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная мультифизическая модель магнитного подвеса на основе 2G ВТСП композитов, которая позволяет проводить

совместный электродинамический и тепловой расчет параметров магнитной системы при движении стопки ВТСП лент в неоднородном магнитном поле. С использованием разработанной модели проведены исследования тепловых характеристик магнитолевитационной системы в динамических режимах, с использованием двух методов охлаждения: криокулерного охлаждения и охлаждения жидким азотом. Исследования проводились путем численного моделирования левитационной системы на основе стопок ВТСП-лент методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. На основании полученных результатов численного моделирования можно заключить, что, охлаждение жидким азотом является эффективным при относительно малых скоростях изменения магнитного поля, которое не приводит к изменению температуры в системе более, чем на 3 К. При превышении этого значения эффективность теплоотдачи в окружающий тепловой резервуар снижается ввиду ухудшения характеристик хладагента при смене режимов кипения.

В заключение отметим, что охлаждение жидким азотом не может понизить температуру сверхпроводящего элемента ниже 65 К (тройная точка азота), в то время как охлаждение с помощью криокулеров позволяет получить любые температуры, вплоть до гелиевых. Таким образом, если при конструировании магнито-левитационных систем предполагаются более низкие рабочие температуры, использование криокулерной техники становится безальтернативным.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Chu BK, Ma KB, McMichael CK, et al. Applications of high temperature superconductors on levitation bearings and other levitation devices. *Applied Superconductivity*, 1993, 1:1259–1264. doi: 10.1016/0964-1807(93)90434-4
2. Moon FC. *Superconducting Levitation: Applications to Bearing & Magnetic Transportation 1994*. August 01, 1994. 310 p. [cited 2022 November 30]. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994slab.book.....M/>
3. Ma K, Postrekhin YV, Chu W-K. Superconductor and magnet levitation devices. *REV SCI INSTRUM*. 2003;74:4989-5017. doi: 10.1063/1.1622973
4. Hull JR. Superconducting bearings. *SUPERCOND SCI TECH* (Online). 2000;13(2):R1-

- R15. doi: 10.1088/0953-2048/13/2/201
5. 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
 6. Deng Z, Zhang W, Zheng J, et al. A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China. *IEEE T APPL SUPERCON*. 2016;26(6):1-8. doi:10.1109/TASC.2016.2555921
 7. Jha AK, Matsumoto K. Superconductive REBCO Thin Films and Their Nanocomposites: The Role of Rare-Earth Oxides in Promoting Sustainable Energy, (in English). *Frontiers in Physics, Review*, 2019;7. doi: 10.3389/fphy.2019.00082
 8. 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. *Superconductor Science and Technology*, 2015;28(4):045011. doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011
 9. 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
 10. 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 TECH*. 2014;27:044022. doi: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
 11. 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
 12. Selvamanickam V. High temperature superconductor (HTS) wires and tapes. 2012. pp. 34-68. doi: 10.1533/9780857095299.1.34
 13. Patel A, Baskys A, Mitchell-Williams T, et al. A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape. *Superconductor Science and Technology*, 2018;31(9):09LT01. doi: 10.1088/1361-6668/aad34c
 14. 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. [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.)]. doi: 10.17816/transsyst20228363-77
 15. 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 <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778821100045#citeas>
 16. SuperOx [Internet]. [cited 2022 November 30]. Available from: <https://www.superox.ru/>
 17. SuNUM [Internet]. [cited 2022 November 30]. Available from: <http://www.i-sunam.com/wp/sunam1-2/?ckattempt=1>
 18. Zubko VV, Fetisov SS, Zanegin SY, et al. Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019;502:012178. doi: 10.1088/1757-899x/502/1/012178

Сведения об авторах:

Мартirosян Ирина Валерьевна, научный сотрудник;
eLibrary SPIN:3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@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

Осипов Максим Андреевич, научный сотрудник;
eLibrary SPIN:4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;
E-mail: max.vfk@gmail.com

Стариковский Александр Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник;
eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID:0000-0002-7605-7578;
E-mail: sann yok1995@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, Research Fellow;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com

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

Maxim A. Osipov, Research Fellow;
eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;
E-mail: max.vfk@gmail.com

Alexander S. Starikovskii, Graduate, junior researcher;
eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID:0000-0002-7605-7578;
E-mail: sann yok1995@gmail.com

Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lead Research
Fellow;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru

Цитировать:

Мартirosян И.В., Покровский С.В., Осипов М.А. и др. Влияние условий охлаждения ВТСП сборок на характеристики движущейся магнитолевитационной системы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 46–57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57

To cite this article:

Martirosian IV, Pokrovskii SV, Osipov MA, et al. Influence of cooling conditions of HTS assembly on the characteristics of a moving maglev system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):46-57. doi: 10.17816/transsyst20228446-57

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 621.313.13

DOI 10.17816/transsyst20228458-73

© В.В. Сироткин, Д.А. Пигалев, И.В. Больших, С.С. Черняев

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВИТКАХ ОБМОТКИ СТАТОРА ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Обоснование: В статье дано описание процесса возникновения дополнительных потерь в крайних витках медных обмоток статора, базирующееся на физических законах. Приведены причины возникновения скин-эффекта в обмотках статора вентильно-индукторного двигателя (ВИД), а также выполнена оценка степени влияния скин-эффекта на дополнительные потери в ВИД средней и большой мощности. Построена 2D-модель сектора ВИД в программном пакете (ПП) «COMSOL Multiphysics» для дальнейшего уточнения распределения магнитного поля в витках обмотки статора и определения количественных значений дополнительных потерь. Для оценки достоверности полученных результатов приведено сравнение распределения магнитного поля ВИД конфигурации 12/8, полученного в программе «FEMM», и распределения магнитного поля сектора ВИД, построенного в ПП «COMSOL Multiphysics».

Цель: Расчет распределения магнитного поля в витках обмотки статора путем поэтапного построения 2D-модели сектора (полусного деления) ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» для дальнейшего определения количественных значений дополнительных потерь, вызванных вихревыми токами в обмотках.

Методы: Для построения 2D-модели сектора ВИД использовался ПП «COMSOL Multiphysics». Для нахождения решения по распределению электромагнитных полей внутри моделируемой области использовался метод конечных элементов (МКЭ), для оценки корректности полученных результатов – метод сравнения с расчетами в программе «FEMM».

Результаты: Картины распределения магнитного поля ВИД, полученные в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM», подтверждают наличие скин-эффекта в крайних витках обмотки статора, способного снизить энергоэффективность ВИД и вызвать локальный перегрев витков обмотки. В результате проведения моделирования картина распределения магнитного поля ВИД, полученная в программе «FEMM», аналогична картине распределения магнитного поля ВИД, полученной в ПП «COMSOL Multiphysics». Относительная погрешность значений магнитной индукции разных частей ВИД находится в пределах 3–7 %, что является допустимым и свидетельствует о корректности компьютерного моделирования в ПП «COMSOL Multiphysics».

Заключение: Картины распределения магнитного поля ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM» подтверждают наличие скин-эффекта в крайних витках обмотки статора, что позволит проводить дальнейшие исследования в области определения численных значений дополнительных потерь с использованием 2D-модели, а также перейти от 2D-модели к 3D-модели ВИД.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, потери в крайних витках обмотки, скин-эффект, вентильно-индукторный двигатель, распределение магнитного поля.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© V.V. Sirotkin, D.A. Pigalev, I.V. Bol'shikh, S.S. Chernyaev

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

APPLICATION OF SPECIALIZED SOFTWARE FOR CALCULATION OF MAGNETIC FIELD IN THE TURNS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS STATOR WINDINGS

Background: The article describes the process of occurrence of additional losses in the extreme turns of the copper stator windings, based on physical laws. The causes of the skin effect in the stator windings of a switched reluctance motor (SRM) are presented, an assessment of the skin effect influence degree on additional losses in the SRM of medium and high power. 2D-model of the SRM sector in “COMSOL Multiphysics” software package is created to specify distribution of magnetic field in the SRM stator windings and to quantify the amount of additional losses. A comparison of the magnetic field distribution of the SRM configuration 12/8 obtained in the “FEMM” program and the SRM magnetic field distribution built in “COMSOL Multiphysics” software package is presented to assess the reliability of the results.

Aim: Calculation of the magnetic field distribution in the turns of the stator winding by building a phased 2D-model of the SRM sector (pole division) in “COMSOL Multiphysics” software package to quantify the amount of additional losses caused by eddy currents in the windings.

Methods: “COMSOL Multiphysics” software package is used to build 2D-sector of the SRM. To obtain results on the distribution of electromagnetic fields within the simulated area, finite element methods (FEM) are used to estimate income adjustments, the results are compared with calculations in the “FEMM” program.

Results: The patterns of the magnetic field distribution of the SRM obtained in “COMSOL Multiphysics” software package and in “FEMM” program confirm the presence of a skin-effect in the extreme turns of the stator winding. It can reduce the energy efficiency of the SRM and cause local overheating of the winding turns. As a result of the simulation, the picture of the magnetic field distribution of the SRM obtained in the “FEMM” program is similar to the picture of the magnetic field distribution of the SRM obtained in “COMSOL Multiphysics” software package. Ratio error of the values of the magnetic induction of different parts of the SRM is 3–7 %. It is acceptable and it indicates the correctness of computer modeling in “COMSOL Multiphysics” software package.

Conclusion: The patterns of the magnetic field distribution SRM in “COMSOL Multiphysics” software package and in the “FEMM” program confirm the presence of the skin-effect in the extreme turns of the stator winding, which will allow further research in the field of determining the numerical values of additional losses using 2D-model, and proceed from 2D-model to 3D-model of the SRM.

Key words: computer modeling, losses at extreme turns of a winding, skin-effect, switched reluctance motor, magnetic field distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Вентильно-индукторные двигатели обладают более высоким КПД по сравнению с применяемыми в настоящее время асинхронными и коллекторными электродвигателями. Поэтому интенсивное изучение, анализ, модернизация конструкции и улучшение технико-экономических показателей являются актуальными задачами. Помимо высокого КПД вентильно-индукторные двигатели (ВИД) обладают следующими существенными преимуществами, представленными на Рис. 1 [1].

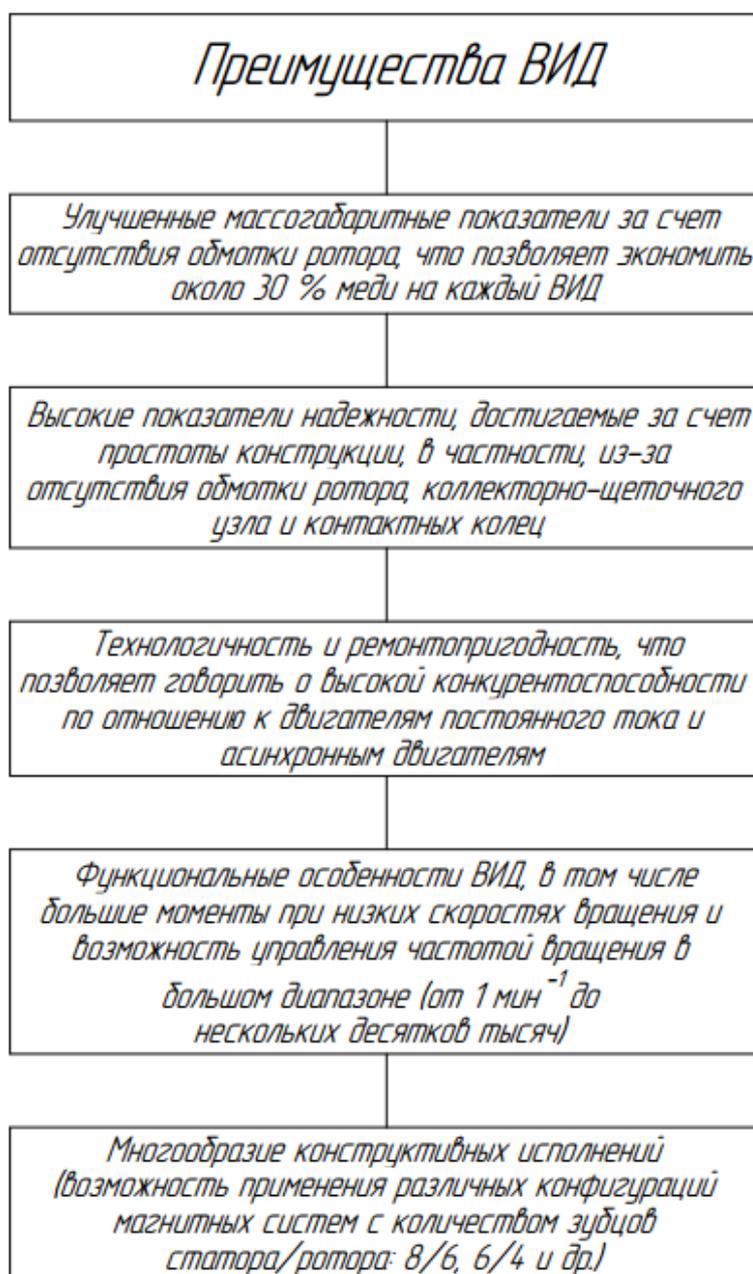


Рис. 1. Преимущества вентильно-индукторного двигателя

Одной из перспективных задач при совершенствовании ВИД является получение значений параметров с достаточно высокой точностью в тех случаях, когда имеющиеся методики эту точность не обеспечивают. В настоящее время ВИД является перспективной, уже достаточно хорошо изученной электрической машиной (ЭМ), находящей все более широкое применение. Важным направлением ее дальнейшего совершенствования, в том числе модернизации конструкции, является определение дополнительных потерь в обмотках статора, вызванных вихревыми токами. Точный расчет этих потерь осложняется трудностями математического характера по причине быстро меняющейся формы магнитного поля, пронизывающего проводники обмотки, которые расположены близко к воздушному зазору, где концентрируется основная энергия магнитного поля. Эта проблема была обозначена в [2], где приведены: природа возникновения дополнительных потерь и негативные последствия, к которым они приводят. Также даны рекомендации по снижению влияния этих потерь на эффективную работу электрической машины. Одним из предложенных вариантов является изменение расстояния витков обмотки до воздушного зазора. Существенное внимание уделено описанию вихревых токов, которые являются одной из причин, вызывающей дополнительные потери, ввиду высокой проводимости меди. Получены зависимости коэффициента $K_{\text{доб}}$ от толщины проводников и расстояния от крайних витков обмотки до воздушного зазора. Особенно интересен тот факт, что данная мера помогает снизить $K_{\text{доб}}$ в 2,4 раза. Однако при выполнении расчетов в [2] были сделаны следующие допущения, для достижения достаточной точности, исходя из поставленной цели – практического внедрения данной машины: не учитывалось насыщение магнитопровода; ротор неподвижен.

Неучет данных факторов оказывает существенное влияние на электроприводы, работающие в широких диапазонах изменения частоты вращения. При насыщении коронок зубцов возрастает магнитное сопротивление для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается, снижается и магнитная проводимость дифференциального рассеяния. Чтобы увеличить точность расчетов, необходимо использовать современное специализированное программное обеспечение. Рационально будет провести расчеты, приняв различные положения зуба и затем усреднить полученные результаты.

Суть рассматриваемых физических процессов. Витки в обмотке статора изолированы друг от друга, а так как теплопроводность меди на порядок превышает теплопроводность изоляции, то изоляция витков, прилегающая к медному проводнику обмотки, подвергается значительному перегреву. Такая особенность характерна при работе тягового двигателя

НТИ-350. Перегрев характерен для витков, расположенных с набегающей части ротора, где наблюдается повышенная плотность магнитного потока [2]. Когда зубцы ротора начинают перекрывать зубцы статора (стремятся к согласованному положению), будет наблюдаться резкое увеличение индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, который «выпучивается» наружу по отношению к магнитной системе. Данный эффект характерен именно для тяговых ВИД и ВИД средней и большой мощности, где медные обмотки наматываются на ребро. Магнитное поле проникает в эту плоскую грань, вызывая дополнительные потери.

Дополнительные потери [2] являются одним из тех факторов, которые снижают надежность ВИД. Эти дополнительные потери вызывают значительный перегрев (на несколько десятков градусов), что может привести к выходу машины из строя (в режимах пуска и торможения). Данная область ВИД также обладает рядом физических явлений, которые способствуют существенному увеличению дополнительных потерь. К таким явлениям относится скин-эффект, характерный для переменного магнитного поля. Изменяющееся магнитное поле по закону электромагнитной индукции создает электрическое индукционное поле. Вектор напряженности индукционного поля в областях, расположенных ближе к оси проводника, направлен противоположно вектору напряженности электрического поля, создающего ток, а в более дальних – совпадает с ним. В результате плотность тока уменьшается в приосевых областях и увеличивается вблизи поверхности проводника, то есть возникает скин-эффект, который вызывает проблемы из-за неравномерного распределения переменного тока по проводнику. Стоит также отметить, что скин-эффект возникает во всех витках, подверженных влиянию переменного магнитного поля. Однако наибольший интерес представляют именно крайние витки, так как на них оказывают влияние вихревые токи. Физическая картина скин-эффекта показана на Рис. 2 [3].

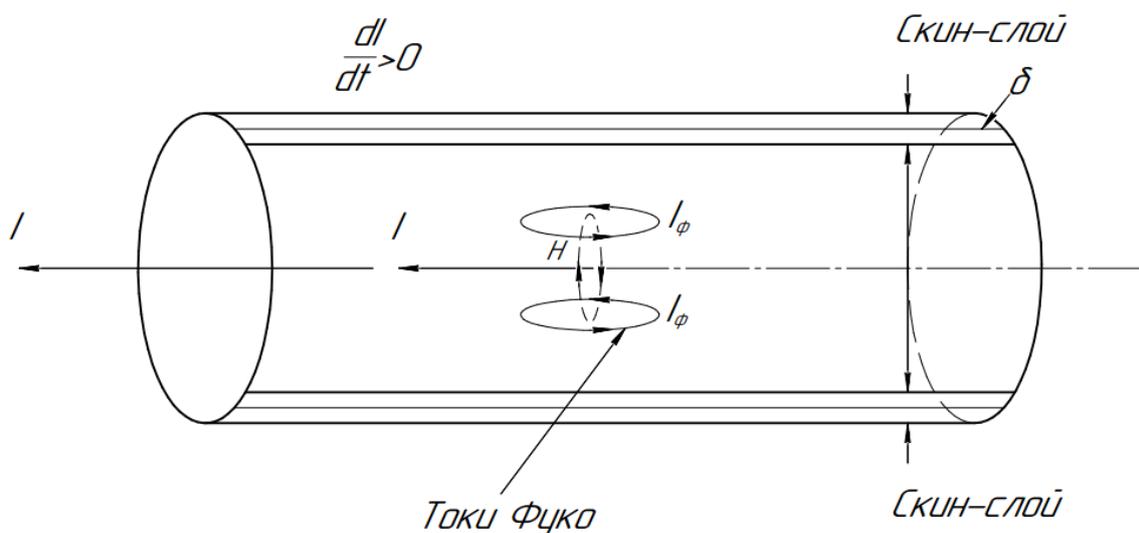


Рис. 2. Физическая картина возникновения скин-эффекта

ПОСТРОЕНИЕ 2D-МОДЕЛИ СЕКТОРА (ПОЛЮСНОГО ДЕЛЕНИЯ) ВИД В ПП «COMSOL MULTIPHYSICS»

Современные программные средства позволяют выполнять расчеты (особенно расчеты, связанные с определением физических параметров вентильно-индукторных двигателей) с точностью, соизмеримой, а в некоторых случаях выше, чем при экспериментальных исследованиях, где точность ограничена средствами измерения. Расчет электромагнитных полей методом конечных элементов (МКЭ) дает такую возможность. С развитием теории и практики использования ЭМ все чаще требуются более точные методы их расчета. Одним из таких методов является компьютерное моделирование с использованием таких программ как «MATLAB/Simulink» и «ELCUT» [4, 5], «ANSYS Maxwell» [6], «FEMM» [7–10], «COMSOL Multiphysics» [11, 12] и др. Следует отметить, что программный пакет (ПП) «COMSOL Multiphysics», предназначенный для мультифизического моделирования, обладает рядом преимуществ в сравнении с ранее перечисленными программами, а именно:

- 1) возможностью 2D- и 3D-моделирования различных процессов, протекающих при работе ЭМ;
- 2) возможностью одновременного моделирования нескольких физических процессов (например, теплового и энергетического расчетов);
- 3) наличием узла «Results», позволяющего отобразить результаты моделирования в табличной, графической и числовой формах;
- 4) удобным интерфейсом (наличие конструктора моделей, в котором наглядно отражены все составляющие «дерева модели»). Конструктор моделей является немаловажным преимуществом данного ПП, так как позволяет отобразить структуру мультифизической модели – геометрическое построение, физические процессы, параметры «решателя» – и мгновенно конкретизировать ошибки в задании тех или иных параметров;
- 5) поэтапным расчетом задач (узел «Study» позволяет настроить оптимальную последовательность решения операций, а также сформировать пакет выходных данных, например изображений и групп графиков).

В связи с перечисленными выше преимуществами в рамках данных исследований было принято решение использовать ПП «COMSOL Multiphysics» для определения потерь на крайних витках обмотки, что является особенно актуальной задачей для крупных тяговых ЭМ [2, 13–16], а проведенные исследования в публикации [17] действительно доказывают наличие скин-эффекта, что подтверждает необходимость дальнейшего изучения вопроса ввиду неравномерного распределения магнитного поля по сечению проводника.

Также отметим, что при изучении скин-эффекта (Рис. 3) были взяты во внимание следующие факторы:

- геометрические размеры ЭМ (в том числе пазов);
- геометрические размеры обмотки статора;
- номинальная мощность ЭМ.

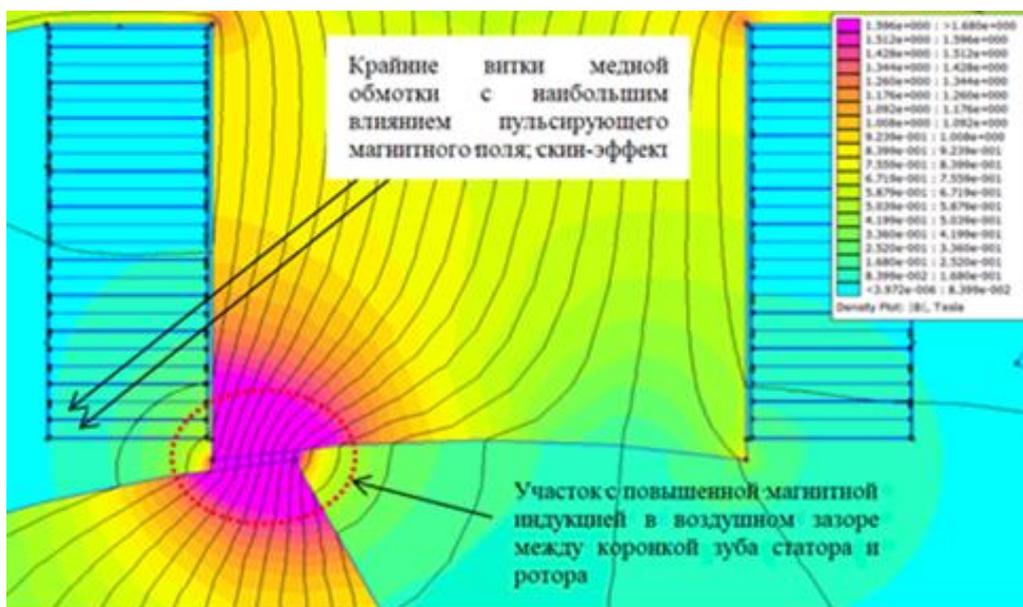


Рис. 3. Область возникновения скин-эффекта в крайних витках обмотки статора вентильно-индукторного двигателя

К величинам, являющимся основополагающими при расчетах ЭМ и оказывающим значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, относятся суммарные потери. В ходе данных исследований особое внимание уделено дополнительным потерям ЭМ [2, 13, 14], в основном, из-за сложности их определения ввиду того, что магнитное поле быстро меняется, а крайние витки обмотки статора подвержены скин-эффекту [14].

К ним относятся потери в медных обмотках, а основной причиной их возникновения являются вихревые токи.

Данные факторы в совокупности значительно затрудняют расчеты, а эмпирические соотношения не позволяют получить данные с необходимой степенью точности. В связи с этим невозможно корректно определить величины дополнительных потерь, вызванных вихревыми токами без картины распределения магнитного поля в проводнике.

Для достижения цели, поставленной в работе, и более детального отображения конструкции ЭМ в ПП «COMSOL Multiphysics» был построен сектор ВИД (90 эл. град.). В дальнейшем ПП «COMSOL Multiphysics» позволит достаточно быстро отобразить полноразмерную

2D-модель, что является еще одним принципиальным преимуществом данного ПП.

На Рис. 4 представлена структурная схема поэтапного построения разработанной 2D-модели сектора ВИД.

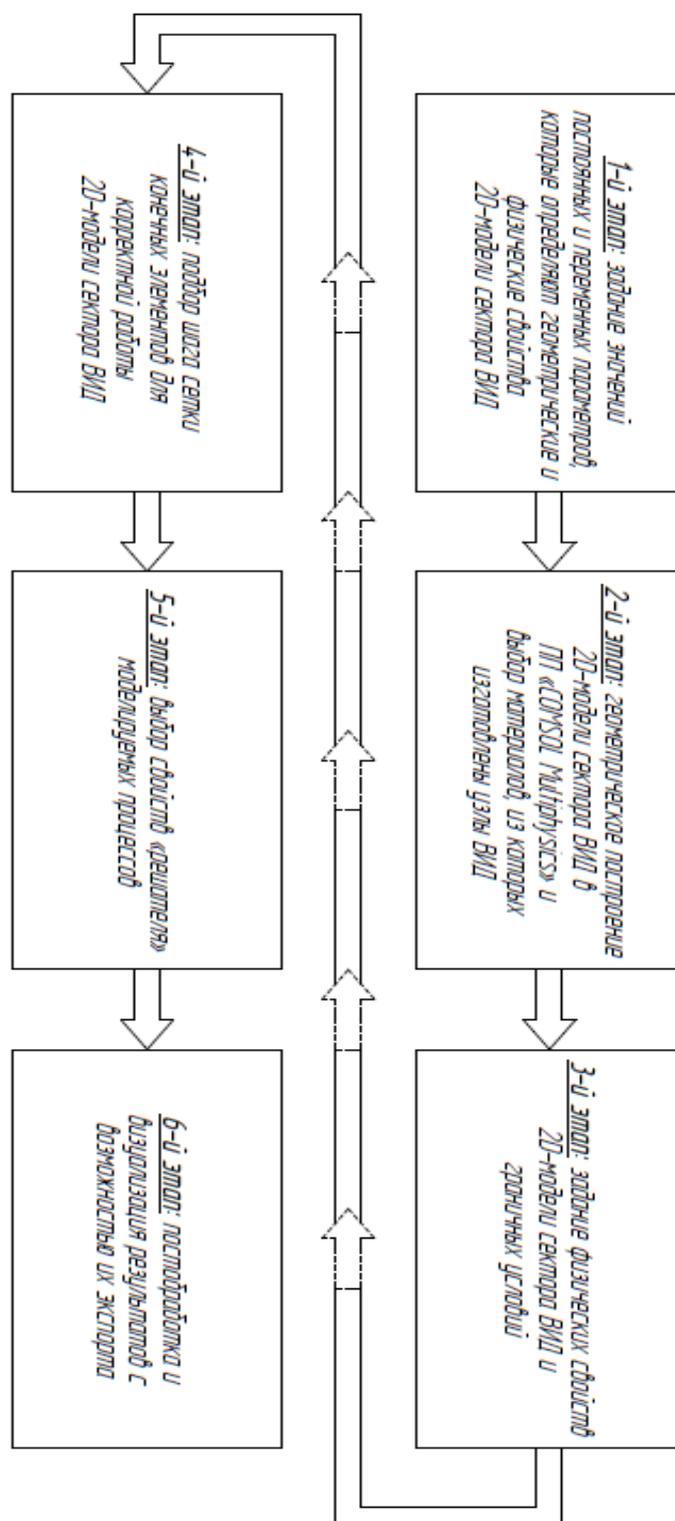


Рис. 4. Структурная схема поэтапного построения 2D-модели сектора ВИД

В процессе настройки модели использовались положения теории электрических машин [14–16].

Для корректной работы 2D-модели сектора ВИД авторами был выполнен подбор шага сетки конечных элементов (Рис. 5).

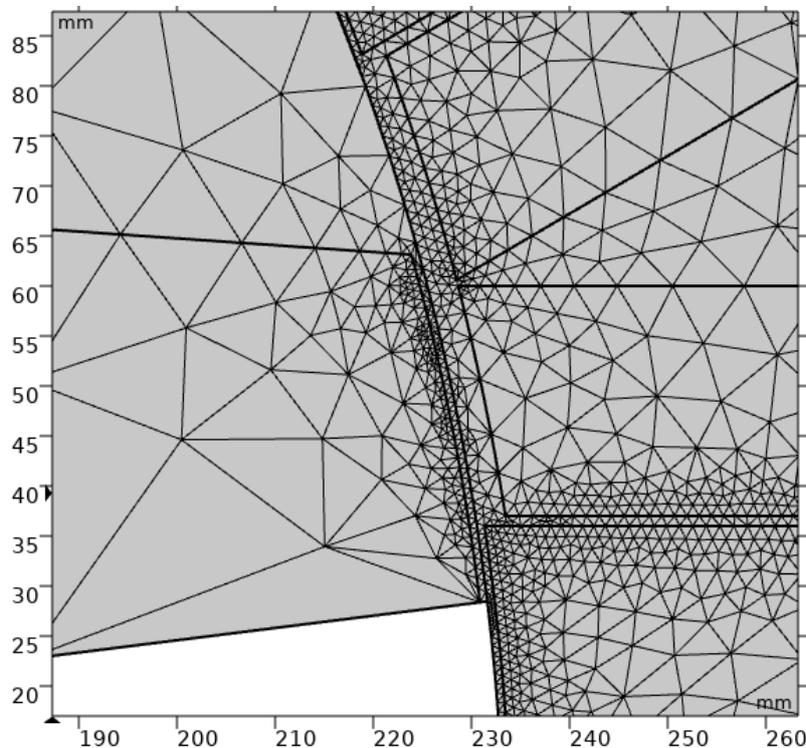


Рис. 5. Подбор шага сетки конечных элементов для корректной работы 2D-модели сектора ВИД в зависимости от конструктивных особенностей

Для уточнения степени влияния скин-эффекта в программе «FEMM» была разработана компьютерная модель ВИД конфигурации 12/8 [17]. Расстояние между витками обмотки статора и воздушным зазором задано согласно технической документации на двигатель НТИ-350 [18]. В дальнейшем его численное значение необходимо скорректировать таким образом, чтобы минимизировать дополнительные потери вследствие возникновения скин-эффекта.

Применение данной модели актуально при расчете тяговых электрических машин средней и большой мощности (тяговых электродвигателей). Используя компьютерную модель, представленную в статье, станет возможным определить оптимальное расстояние до воздушного зазора с учетом имеющихся по ГОСТу диаметров сечения проводников после получения количественных значений дополнительных потерь. В свою очередь более точное определение этих потерь позволит избегать перегрева крайних витков, что значительно повысит надежность работы электрической машины.

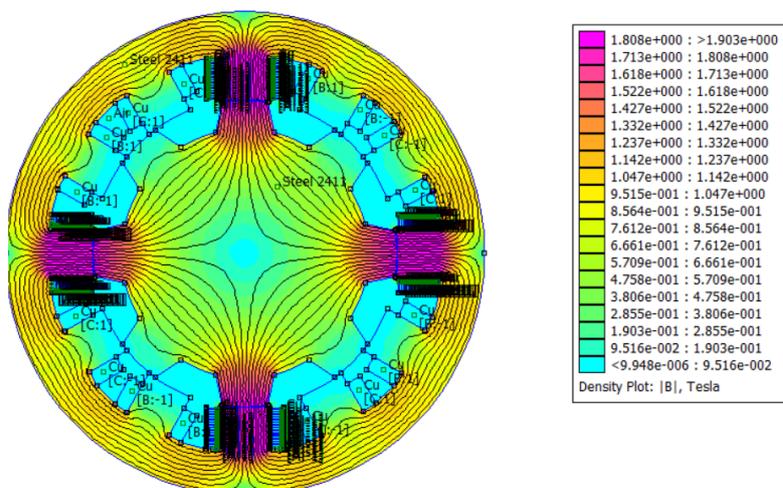
Далее представлено сравнение компьютерных моделей сектора ВИД

и магнитной системы ВИД конфигурации 12/8, разработанных в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM».

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки достоверности полученных результатов приведем сравнение распределения магнитного поля ВИД конфигурации 12/8, полученного в программе «FEMM» (Рис. 6а, Рис. 7а) и распределения магнитного поля сектора ВИД, построенного в ПП «COMSOL Multiphysics» (Рис. 6б, Рис. 7б) [19].

а)



б)

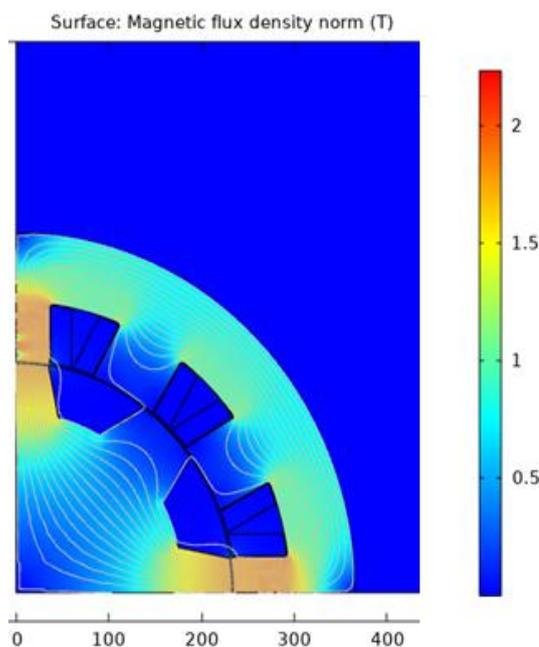
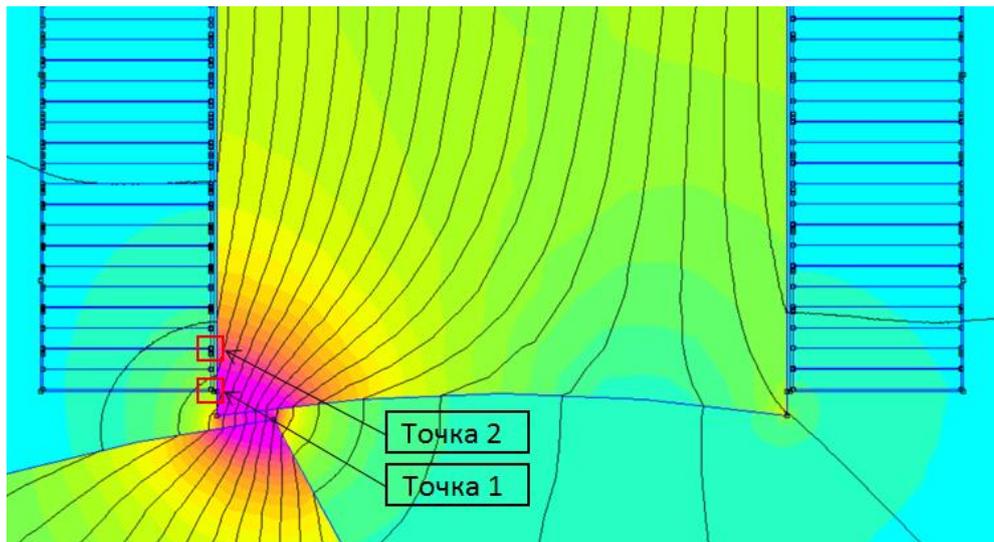


Рис. 6. Распределение магнитного поля ВИД, полученное в программе «FEMM» и в ПП «COMSOL Multiphysics»: а – в программе «FEMM»; б – в ПП «COMSOL Multiphysics» (сектор ВИД)

а)



б)

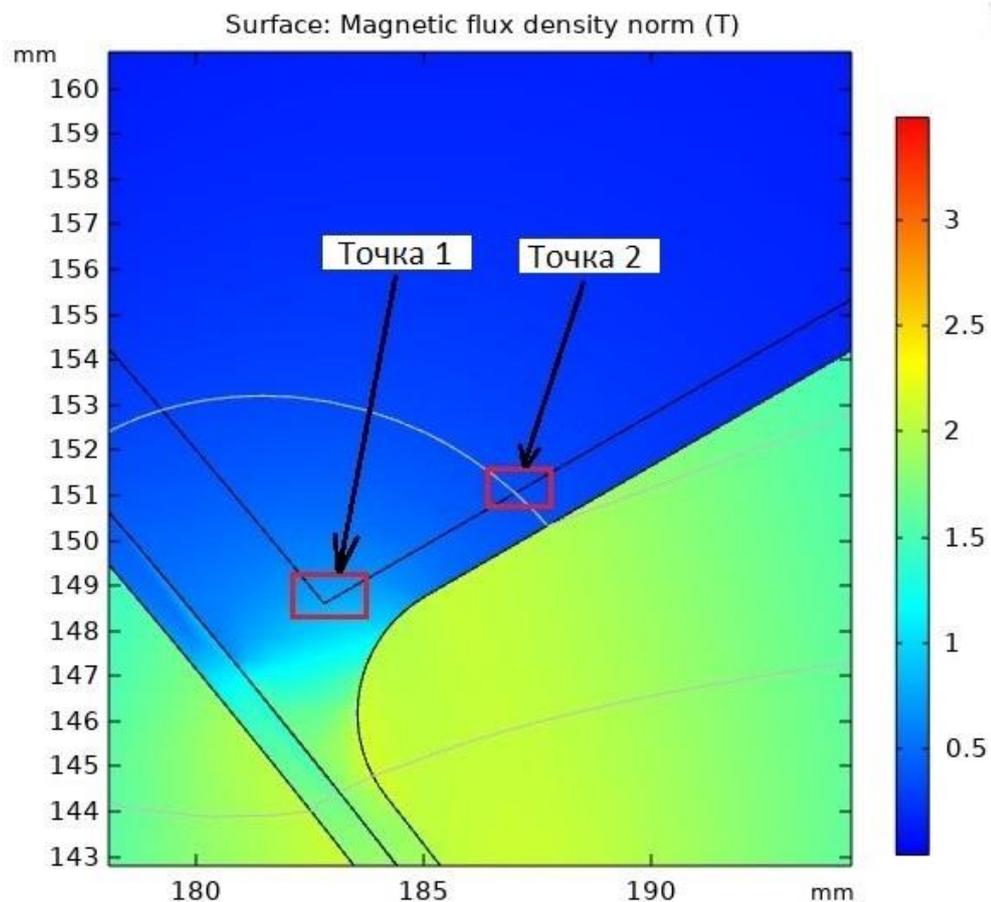


Рис. 7. Сравнение численных значений магнитной индукции в двух точках в зависимости от расстояния до воздушного зазора между статором и ротором ВИД:
а – в программе «FEMM»; б – в ПП «COMSOL Multiphysics» (сектор ВИД)

Анализируя Рис. 6, Рис. 7, приходим к выводу о том, что картина распределения магнитного поля ВИД, полученная в программе «FEMM», аналогична картине распределения магнитного поля сектора ВИД, полученной в ПП «COMSOL Multiphysics». Значения магнитной индукции в точке 1, рассчитанные в программе «FEMM» и в ПП «COMSOL Multiphysics» ($|B_1| = 0,634$ Тл, $|B_3| = 0,678$ Тл), значительно превосходят значения магнитной индукции в точке 2 ($|B_2| = 0,371$ Тл, $|B_4| = 0,360$ Тл), что наглядно показывает наличие скин-эффекта.

В соответствии с формулами (1), (2) были вычислены относительные погрешности значений магнитной индукции для точек 1 и 2:

$$\delta_1 = \frac{|B_3| - |B_1|}{|B_1|} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где B_3 – значение магнитной индукции в точке 1, полученное в ПП «COMSOL Multiphysics», Тл;

B_1 – значение магнитной индукции в точке 1, полученное в программе «FEMM», Тл.

$$\delta_2 = \frac{|B_2| - |B_4|}{|B_4|} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где B_4 – значение магнитной индукции в точке 2, полученное в ПП «COMSOL Multiphysics», Тл;

B_2 – значение магнитной индукции в точке 2, полученное в программе «FEMM», Тл.

Относительная погрешность значений магнитной индукции для точки 1 составила 6,94 %, для точки 2 – 3,06 %. Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о корректности компьютерного моделирования в ПП «COMSOL Multiphysics».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ВИД становится все более актуальным из-за ряда преимуществ по сравнению с используемыми в настоящее время электродвигателями (в том числе более высокий КПД). В ходе изучения данного типа ЭМ были проанализированы причины возникновения дополнительных потерь, имеющих непосредственное влияние на целостное состояние изоляции обмоток статора. Также описана природа

возникновения скин-эффекта, возникающего под влиянием переменного магнитного поля.

Картины распределения магнитного поля сектора ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM» подтверждают наличие скин-эффекта в витках обмотки статора, что позволит проводить дальнейшие исследования в области определения численных значений дополнительных потерь с использованием 2D-модели, а также перейти от 2D-модели к 3D-модели ВИД.

Учет скин-эффекта в крайних витках обмотки статора даст возможность скорректировать значения дополнительных потерь и на основе полученных результатов определить оптимальное расстояние от этих крайних витков обмотки до воздушного зазора, что актуально для электрических машин средней и большой мощности.

Авторы заявляют, что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Петрушин А.Д., Ворон О.А, Смачный Ю.П. Вентильно-индукторные машины для железнодорожного подвижного состава // Вестник «ВЭЛНИИ». – 2005. – Вып. 1 (48). – С. 147–159. [Petrushin AD, Voron OA, Smachny YuP. Switched reluctance motors for railway rolling stock. *Vestnik VEINII*. 2005;1(48):147-159. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11717765>
2. Пахомин С.А., Прокопец А.И., Щербаков В.Г., Захаров В.И. К расчету добавочных потерь в тяговом индукторном двигателе // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 39–42. [Pakhomin SA, Prokopets AI, Shcherbakov VG, Zakharov VI. To the problem of calculation of additional losses in a traction switched reluctance motor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. Electromechanics*. 2010;5:39-42. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17059154>
3. Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Колмыкова М.Ю. Компьютерная модель для определения дополнительных потерь в крайних витках обмотки статора вентильно-индукторного двигателя // Сборник статей «Механика и трибология транспортных систем (МехТрибоТранс–2021)». Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – С. 141–145. [Sirotkin VV, Pigalev DA, Kolmykova MYu. Computer model for calculation of supplementary losses in the end winding turns of the stator of the switched reluctance motor. Collection of articles “Mechanics and tribology of transport systems” (MechTriboTrans-2021). Rostov-on-Don: RSTU; 2021. pp. 141-145. (In Russ.)]. doi: 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_141
4. Нгуен Куанг Кхоа. Методика моделирования вентильно-индукторных двигателей с помощью программ Elcut и Matlab Simulink // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2. – С. 73–79. [Nguyen Quang Khoa. Method of modeling of switched reluctance motor using Elcut and Matlab Simulink.

- Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. Electromechanics.* 2016;2:73-79. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25767917>
5. Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя // *Транспортные системы и технологии.* – 2020 – Т. 6 – № 1 – С. 30–47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47. [Kashuba AV. Optimization Method for calculating the Geometrical Dimensions of the tooth Zone of the switched reluctance motor. *Transportation Systems and Technology.* 2020;6(1):30-47. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst20206130-47
 6. Чавычалов М.В., Черняев С.С., Пигалев Д.А. Моделирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в программе MAXWELL ANSOFT // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2018. – № 3 (спецвыпуск). – С. 38–44. [Chavychalov MV, Chernyaev SS, Pigalev DA. Modeling of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor in the MAXWELL ANSOFT program. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya.* 2018;3(special issue):38-44. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36474361>
 7. Кашуба А.В. Особенности компьютерного моделирования электромагнитных процессов в вентильно-индукторном двигателе // *Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2017»).* Т. 1. Технические науки. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2017. – С. 145–149. [Kashuba AV. Features of computer modeling of electromagnetic processes in a switched reluctance motor. Collection of scientific papers “Transport: science, education, production” (“Transport-2017”). Т. 1. Technical sciences. Rostov-on-Don: RSTU; 2017. pp. 145-149. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32624906&pff=1>
 8. Сироткин В.В. Исследование статических характеристик магнитных систем вентильно-индукторных двигателей // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2020. – № 3 (52). – С. 38–44. [Sirotkin VV. Research of static characteristics of magnetic systems of switched reluctance motor. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya.* 2020;3(52):38-44. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44013146>
 9. Grebennikov NV, Talakhadze TZ, Kashuba AV. Equivalent magnetic circuit for switched reluctance motor with strong mutual coupling between phases, 2019. *26th International workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED);* Moscow, Russia; 2019. pp. 1-5. doi: 10.1109/IWED.2019.8664226
 10. Finite Element Method Magnetics: HomePage [Internet]. [cited 2022 november 13]. Available from: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
 11. Шабанов А.С., Нейман В.Ю. Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // *Современные материалы, техника и технологии.* – 2017. – № 5 (13). – С. 96–100. [Shabanov AS, Neiman VYu. Application of FEMM and COMSOL Multiphysics software packages in the problems of calculating linear electromagnetic motors. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii.* 2017;5(13):96-100. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30363053>
 12. Сайт компании COMSOL. [COMSOL website. [Internet]. (In Russ.). Ссылка активна на 23.10.2022. Доступно по: <http://www.comsol.ru>
 13. Щербаков В.Г., Петрушин А.Д., Хоменко Б.И. и др. Тяговые электрические

машины: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 641 с. [Shherbakov VG, Petrushin AD, Homenko BI, et al. *Tjagovye jelektricheskie mashiny*. Moscow: “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte”; 2015. 641 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29343796>

14. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. [Kopylov IP. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: YUrajt; 2012. 767 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20243677>
15. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications. Virginia: The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering; 2001. 416 p. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.45&rep=rep1&type=pdf>
16. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2003. – 70 с. [Kuznetsov VA, Kuzmichev VA. *Ventil'no-induktornyye dvigateli: uchebnoe posobie*. Moscow: MEI; 2003. 70 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: https://www.studmed.ru/kuznecov-va-kuzmichev-va-ventilno-induktornye-dvigateli_5961d6f8f15.html
17. Пигалев Д.А., Сироткин В.В., Черняев С.С. Определение дополнительных потерь в обмотках вентильно-индукторных машин // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2020»). Т. 2. Технические науки. Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – С. 159–162. [Pigalev DA, Sirotkin VV, Chernyaev SS. Determination of additional losses in the windings of switched reluctance motors. Collection of scientific papers “Transport: science, education, production” (“Transport-2020”). Т. 2. Technical sciences. Rostov-on-Don: RSTU; 2020. pp. 159-162. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44143256&pff=1>
18. Каталог электродвигателей Новочеркасского электровозостроительного завода. [Katalog elektrodvigatelej Novoчеркасского электроvozostroitel'nogo zavoda. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступна по: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html>

Сведения об авторах:

Сироткин Вячеслав Викторович, ассистент;
eLibrary SPIN: 5002-6276; ORCID: 0000-0002-8645-0154;
E-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Пигалев Дмитрий Александрович, инженер;
eLibrary SPIN: 1212-0696; ORCID: 0000-0001-6463-3390;
E-mail: dima.pigaliiov@yandex.ru

Больших Иван Валерьевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 9332-6389; ORCID: 0000-0001-9433-3356;
E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Черняев Семен Сергеевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 2234-9333; ORCID: 0000-0001-7882-6185;
E-mail: MrZemen@yandex.ru

Information about the authors:**Vyacheslav Sirotkin;** Assistant;

eLibrary SPIN: 5002-6276; ORCID: 0000-0002-8645-0154;

E-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Dmitriy Pigaley; Engineer;

eLibrary SPIN: 1212-0696; ORCID: 0000-0001-6463-3390;

E-mail: dima.pigaliov@yandex.ru

Bol'shikh Ivan Valerievich; Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

eLibrary SPIN: 9332-6389; ORCID: 0000-0001-9433-3356;

E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Semyon Chernyaev; Postgraduate;

eLibrary SPIN: 2234-9333; ORCID: 0000-0001-7882-6185;

E-mail: MrZemen@yandex.ru

Цитировать:

Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Больших И.В., Черняев С.С. Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 58–73. doi: 10.17816/transsyst20228458-73

To cite this article:

Sirotkin VV, Pigaley DA, Bol'shikh IV, Chernyaev SS. Application of specialized software for calculation of magnetic field in the turns of switched reluctance motors stator windings. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):58-73. doi: 10.17816/transsyst20228458-73

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

УДК [UDC] 621.311

DOI 10.17816/transsyst20228474-90

© В.Л. Незевак, А.Д. Дмитриев

Омский государственный университет путей сообщения
(Омск, Россия)

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Обоснование: определение энергетических показателей системы тягового электроснабжения на основе графика движения поездов в условиях работы устройств накопления выполняется с помощью способов решения ряда мгновенных схем, каждая из которых соответствует установившемуся режиму работы. Указанные способы требуют адаптации при нелинейных характеристиках или показателях, значения которых связаны с ретроспективой изменения, и не применимы для анализа динамических процессов. В связи с этим для решения задач, связанных с оценкой динамически изменяющихся показателей работы, с анализом работы в переходных или аварийных режимах необходимо использовать методы расчета, основанные на решении непрерывно изменяющихся величин. Моделирование работы систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения позволяет оценить изменение показателей в зависимости от места размещения, топологии гибридных устройств, рода тока системы тягового электроснабжения, параметров устройств, тяговой нагрузки и схемных решений, выполнить апробацию результатов расчетов параметров накопителей электроэнергии, преобразователей и силовых трансформаторов.

Цель: разработать модели систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, получить результаты расчета основных энергетических показателей, определить пути совершенствования схемных решений на основе выявленных особенностей, определить технические требования к системам накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении.

Материалы и методы: для получения результатов используются способы моделирования процессов в электротехнике, основанные на схемах замещения аккумуляторов, силового оборудования и преобразователей, машин постоянного тока, на основе моделей, реализованных в программном комплексе Matlab.

Результаты: предложены модели систем накопления электроэнергии для тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, по результатам моделирования получены данные изменения токов и напряжений для узлов модели, определена перспектива дальнейших исследований в части отработки схемных решений, расчета параметров и разработки алгоритмов для систем регулирования.

Заключение: результаты исследования позволяют использовать полученные модели систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. Модели предназначены для апробации результатов решения задач по структурному и параметрическому синтезу и разработке технических требований к системам накопления электроэнергии, разрабатываемых для систем тягового электроснабжения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, устройство накопления электроэнергии, математическая модель, активная и пассивная топология, преобразователь, трансформатор, система регулирования.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© V.L. Nezevak, A.D. Dmitriev

Omsk State Transport University

(Omsk, Russia)

SIMULATION OF WORK ELECTRICITY STORAGE DEVICES IN THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Background: the determination of the energy indicators of the traction power supply system based on the train schedule in the conditions of operation of storage devices is based on the solution of a number of instantaneous schemes, each of which corresponds to the established operating mode. These methods require adaptation to account for non-linear characteristics or indicators, the value of which is associated with the retrospective of the change. In this regard, it is necessary to use calculation methods based on the solution of differential equations to solve problems related to the assessment of performance in transient or emergency modes, taking into account dynamic characteristics. Modeling the operation of storage devices in the traction power supply system allows you to evaluate the change in indicators depending on the parameters of the devices, traction load and circuit solutions for various topologies.

Aim: to determine the structure of models of electric power storage devices in DC and AC traction power supply systems, to consider the results of calculating the main energy indicators, to determine ways to improve circuit solutions based on the identified features, to determine the technical requirements for electric power storage devices in traction power supply.

Materials and Methods: to obtain the results, methods for solving differential equations corresponding to various variants of the topology of storage devices in traction power supply, implemented in the Matlab software package, are used.

Results: the results obtained allow us to determine the structure of storage devices for traction power supply, evaluate models of devices for traction power supply of direct and alternating current, outline the prospects for further research in the field of circuit solutions and required device parameters.

Conclusion: the results of the study allow models of electricity storage devices and technical solutions for their implementation aimed at introducing DC and AC traction power supply into the system.

Key words: traction power supply system, electric power generation device, mathematical model, active and passive topology, converter, transformer, control system.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое обсуждение и исследование возможных перспектив применения систем накопления электроэнергии, обусловлено меняющейся проблематикой вопросов, стоящих перед электроэнергетикой, обусловленных появлением распределенной генерации, возобновляемых источников электроэнергии, способов оптимизации режимов работы и др.

Возможности систем накопления электроэнергии позволяют подойти к решению ряда задач, среди которых следует отметить: выравнивание графика нагрузки; повышение качества электроэнергии; стабилизацию напряжения; повышение эффективности источников возобновляемой энергетики; автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности; повышение надежности электроснабжения; компенсацию реактивной мощности и др. [1].

Применение систем накопления рассматривается в концепции построения энергетического хаба, как это показано, например, в [2, 3], где накопители используются для хранения различных видов энергии, в том числе электрической энергии, представлена модель в Matlab, учитывающая работу данных накопителей. Системы накопления находят применение и прорабатываются варианты их использования в автономных системах электроснабжения, для которых разрабатываются соответствующие модели с целью оценки различных режимов работы. Разрабатываемые в Matlab модели содержат электростанции и преобразователи для подключения накопителей электроэнергии, например, как это показано в [4, 5]. В области возобновляемых источников энергии исследования включают в себя моделирование на основе моделей в Matlab с использованием различных источников энергии и накопителей различного вида, как это показано, например, в [6, 7].

В ряде случаев работу системы накопления электроэнергии в автономных системах электроснабжения исследуют для случаев их подключения к шинам постоянного тока, использующихся для возобновляемых источников энергии (фото- или ветрогенерации), как это показано на примере модели в Matlab в статье [8].

Исследованию статической характеристики системы накопления электроэнергии посвящено моделирование в Matlab распределенной генерации с использованием способа разбивки статической характеристики на отдельные участки с разной крутизной (коэффициентом статизма) [9].

Сдерживающим фактором при внедрении систем накопления электроэнергии является стоимость. В настоящее время существует несколько вариантов снижения стоимости проектов указанных проектов, которые включают в себя определение параметров систем с учетом срока службы и деградации емкости накопителей, ресурса работы, участия в

управлении спросом на электроэнергию (мощность), регулирования частоты и др. [10]. Различие характеристик систем накопления привело к появлению гибридных систем, для которых рассматривается различная топология реализации, например, полуактивная, в которой суперконденсатор выполняет роль буфера для сглаживания пиковых нагрузок аккумуляторной батареи, как это показано на основе моделирования в Matlab [11].

В области систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока применение систем накопления электроэнергии направлено на решение двух важнейших задач – повышение пропускной и провозной способности и энергетической эффективности. Указанные задачи наиболее эффективно могут быть решены на участках с применением электроподвижным составом рекуперативного торможения. В работе на примере модели системы электроснабжения железнодорожного транспорта в Matlab показано влияние систем накопления электроэнергии на снижение глубины провала напряжения и перерегулирование частоты вращения роторов генераторов распределенной генерации [12].

Применение систем накопления в системах тягового электроснабжения рассматривается для различных мест размещения: тяговые подстанции; линейные устройства; устройства распределенной генерации. В качестве примера можно привести исследования по применению систем накопления на тяговых подстанциях метрополитена [13], определения энергоемкости бортовых систем накопления для тягового подвижного состава [14], исследованию гибридных систем накопления в системах тягового электроснабжения [15].

Указанные выше результаты исследований не позволяют в полной мере оценить технических требований к системам накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, содержащих преобразователи, силовые трансформаторы, комплекс релейной защиты и автоматики, заземление, телемеханику и др. Кроме того, существует ряд задач по оценке условий эксплуатации систем накопления электроэнергии в различных режимах работы системы тягового электроснабжения и условиях формирования тяговой нагрузки, например, ресурса работы [16].

Для решения указанных задач необходимо исследовать отдельные вопросы в указанных областях и определить рекомендуемые параметры систем накопления электроэнергии, помимо основных энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения, с учетом накопленного опыта моделирования указанных систем в Matlab.

РАЗМЕЩЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Основными задачами, стоящими перед системами накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения, являются задачи, связанные с повышением пропускной и провозной способности.

Кроме указанных задач системы накопления позволяют решать задачи, связанные

- с повышением энергетической эффективности;
- с повышением качества электроэнергии;
- выравнивания графика нагрузки;
- эффективности рекуперативного торможения электроподвижного состава;
- работы возобновляемых источников энергии и объектов распределенной генерации.

В зависимости от решаемых задач определяется место размещения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении. На примере системы тягового электроснабжения постоянного тока размещение систем накопления электроэнергии для решения наиболее распространенных задач выглядит следующим образом (Рис. 1). Задачи повышения качества электроэнергии на границах балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности могут решаться при размещении систем на стороне высшего напряжения (блоки 1 на Рис. 1). Задачи по повышению качества электроэнергии на шинах среднего и низшего напряжения решаются путем размещения в соответствующих распределительных устройствах или на присоединениях (блоки 2 и 3). Резервирование источников собственных нужд и ликвидация провалов напряжения выполняются за счет размещения систем со стороны низшего напряжения собственных нужд переменного или постоянного тока (блоки 4). Повышение нагрузочной способности, ограничение перегрузки преобразовательных агрегатов и прием энергии рекуперации выполняется за счет подключения систем накопления к шинам постоянного тока напряжением 3,3 кВ (блоки 5). Стабилизация напряжения в контактной сети и прием энергии рекуперации реализуется за счет размещения систем на линейных объектах контактной сети – пунктах параллельного соединения и постов секционирования (ППС и ПС, блоки 6 и 7). Для решения задач в послеаварийных и вынужденных режимах могут использоваться мобильные системы, подключаемые в требуемых ординатах к контактной сети для усиления тягового электроснабжения (блоки 8). При внедрении мобильных газотурбинных или дизельных электростанций, возобновляемых источников энергии (солнечный, ветряных и др. видов) системы накопления позволяют повысить эффективность их работы при подключении к соответствующим

собственных нужд до 1000 В (220/400 В переменного или 110/220 В постоянного тока) (Рис. 2 б); подключение к шинам однофазного переменного тока напряжением свыше 1000 В (25 кВ) (Рис. 2 в); подключение к шинам трехфазного тока напряжением свыше 1000 В (6 – 220 кВ) (Рис. 2 г).

Подключение накопителя электроэнергии (ЕРС, Рис. 2) к шинам постоянного тока напряжением 3,3 кВ осуществляется с помощью двунаправленного преобразователя DC-AC и силового трансформатора Т. При подключении ЕРС к шинам собственных нужд переменного тока используется прямое подключение к силовому трансформатору и шинам переменного тока напряжением до 0,4 кВ или подключение к шинам постоянного тока напряжением 110 – 220 В с последующим подключением к силовому трансформатору и шинам переменного тока напряжением 0,4 кВ. При подключении ЕРС к тяговой сети или шинам трехфазного напряжения используется преобразователь DC-AC и силовой однофазный или трехфазный трансформатор соответственно.

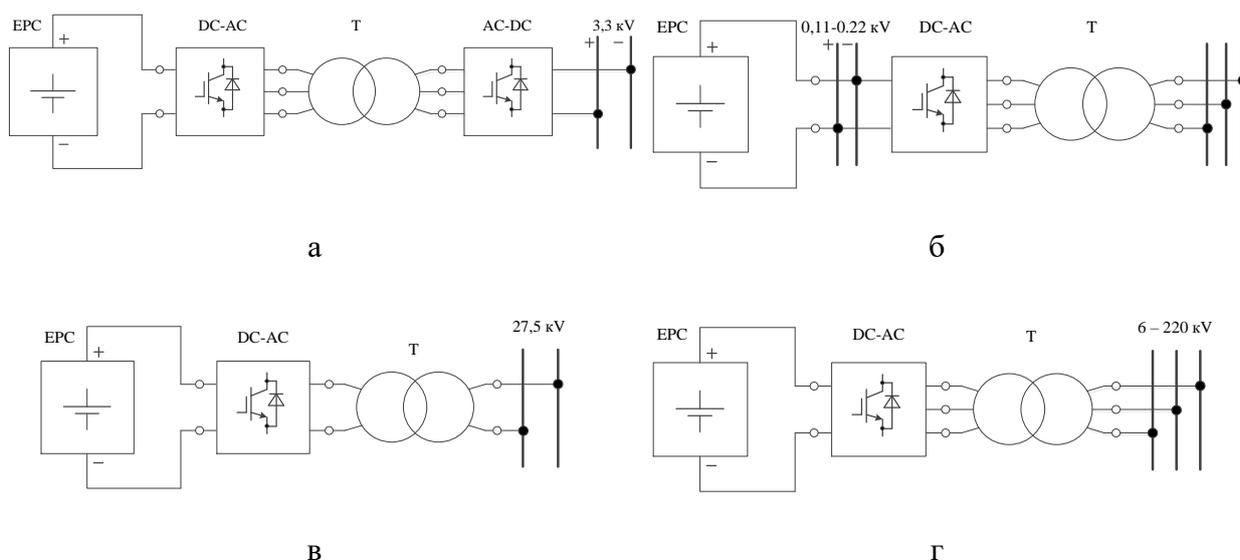


Рис. 2. Основные схемы подключения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении:

- подключение к шинам 3 кВ (а);
- подключение к шинам собственных нужд (б);
- подключение к шинам 27,5 кВ (в);
- подключение к шинам 6 – 220 кВ (г)

Варианты подключения гибридных систем накопления электроэнергии к шинам постоянного напряжения зависят от применяемой топологии. На Рис. 2 показано подключение системы накопления к шинам, от которых подключен преобразователь DC-AC. В случае использования гибридных накопителей возможна реализация схем подключения на основе пассивной, полуактивной или активной топологии с использованием дополнительных преобразователей.

Появление гибридных систем накопления обусловлено широким применением электрохимических накопителей (различного рода аккумуляторов) и их характеристик, связанных с необходимостью учета глубины разряда в рабочих режимах, циклирования и деградации емкости. Использование суперконденсаторов в составе гибридной системы позволяет снизить влияние на аккумулятор резкопеременной нагрузки за счет компенсации ее воздействия при работе суперконденсатора. Работа суперконденсаторов позволяет снизить глубину разряда аккумуляторов при набросе нагрузки и уменьшить циклическую деградацию аккумуляторов при работе в режиме разряда, разряда, в том числе при рекуперативном торможении [17].

Рассмотрим топологию гибридных систем накопления, построенную на основе электрохимических и электрических накопителей, в которых нагрузка подключена с помощью преобразователя DC-AC, который может включать в свой состав силовой трансформатор, как было рассмотрено ранее (см. Рис. 2). В общем случае в состав гибридной системы накопления электроэнергии входят следующие элементы (Рис. 3): аккумулятор (АКБ) и суперконденсатор (СК); преобразователь DC-DC или DC-AC (П); силовой трансформатор (Т); нагрузка (Н).

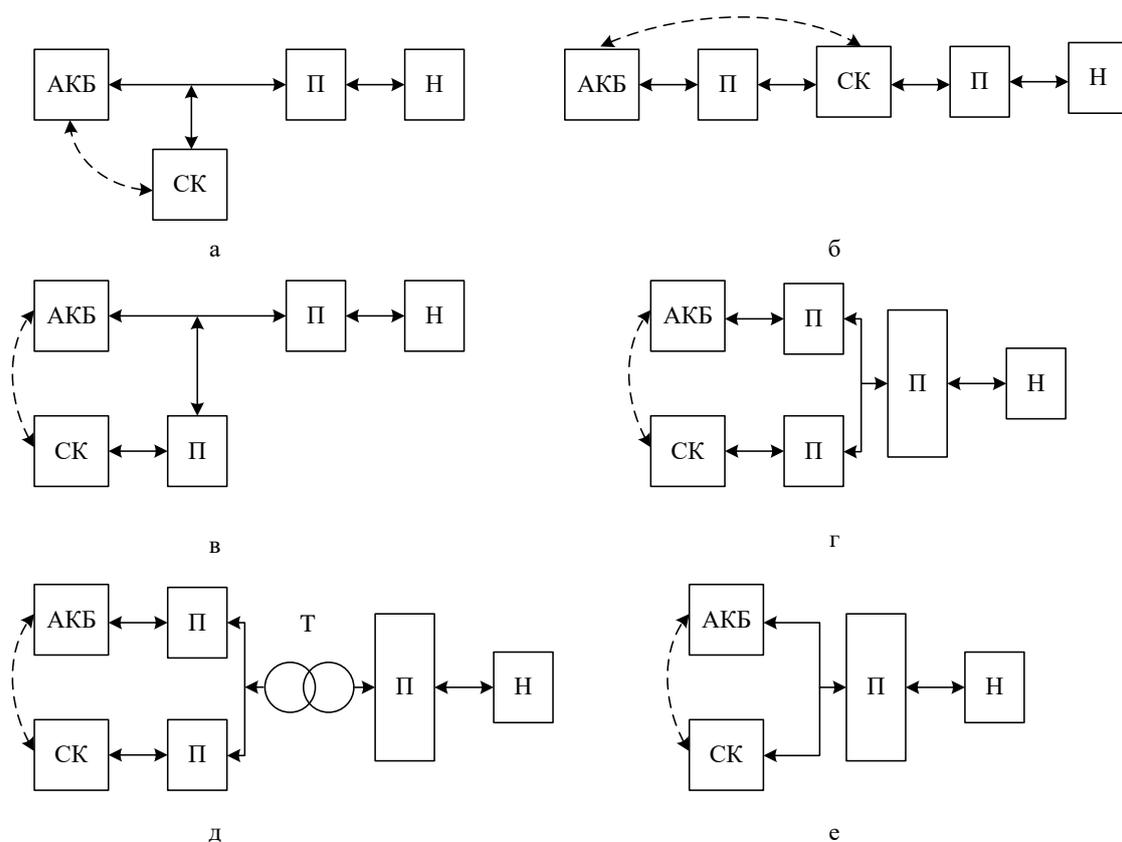


Рис. 3. Топология гибридных систем накопления: пассивная (а); полуактивная (б); ряд активной топологии (в); параллельная активная (г); изолированная активная (д); многоуровневая (е)

Реализация топологий требует применения различного количества двунаправленных преобразователей DC-DC и DC-AC и позволяет оценить схемные решения по стоимостным характеристикам. Пассивная топология характеризуется отсутствием преобразователя между АКБ и СК, в то время как для полуактивной или активной топологии накопителя АКБ и СК разделены работающим преобразователем. Схемные различия позволяют реализовать различные алгоритмы управления накопителями в составе системы, в основе которых лежит использование СК для компенсации наброса нагрузки и высокочастотных возмущений, а АКБ, в зависимости от решаемых задач, для использования в качестве оперативного резерва, замены вращающегося резерва или выравнивания графика нагрузки [18].

В тяговом электроснабжении использование систем накопления электроэнергии направлено на решение одной из важнейших задач по повышению показателей нагрузочной способности, позволяющих обеспечить на заданном уровне пропускную и провозную способность участка железной дороги по устройствам энергетики.

МОДЕЛИ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ В ТЯГОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Построение систем накопления на основе одного вида накопителя электроэнергии не требует дополнительных преобразователей и строится с использованием двунаправленных преобразователей DC-AC. Имитационное моделирование систем накопления рассмотрим на примере реализации для тягового электроснабжения постоянного и переменного тока (Рис. 2 а, б). Модель содержит следующие основные элементы: аккумулятор, преобразователи, силовой трансформатор, машины постоянного тока, имитирующие работу коллекторных тяговых электродвигателей.

Моделирование работы в режиме разряда системы накопления для тягового электроснабжения постоянного тока представляется в виде следующей модели (Рис. 4). В качестве аккумуляторной батареи используется литий-ионный аккумулятор с номинальным напряжением 400 В и емкостью 1000 А·ч. Для моделирования принято, что начальная степень заряженности SoC равна 100 %. Для моделирования используются трехфазные мостовые преобразователи на базе IGBT-модулей. Модель трехфазного силового трансформатора имеет следующие параметры: схема соединения обмоток – треугольник-звезда; номинальная мощность – 1 МВ·А; номинальное фазное напряжение вторичной обмотки – 2600 В; номинальная частота – 50 Гц. Для регулирования работы IGBT-модулей двухуровневого преобразователя используется PWM-генератор, позволяющий реализовать широтно-импульсное (ШИМ) управление для несущей частоты 50 Гц.

Результаты имитационного моделирования работы системы накопления электроэнергии для тягового электроснабжения постоянного тока в режиме разряда приведены на Рис. 5.

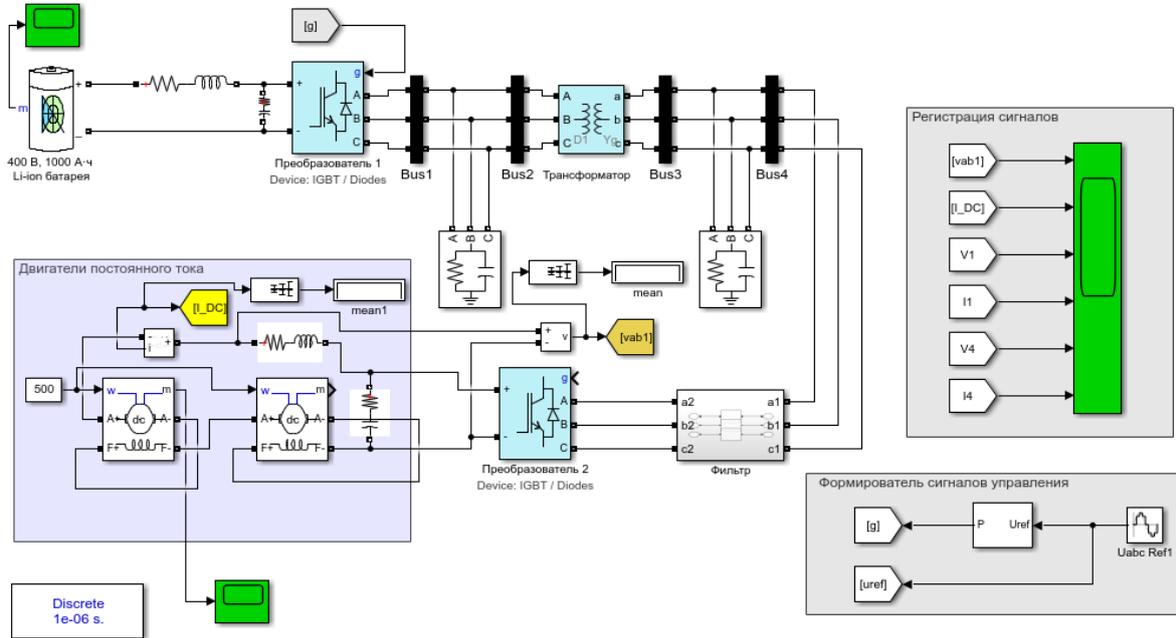


Рис. 4. Модель системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока для режима разряда

Результаты моделирования с нагрузкой позволяют построить графики токов и напряжений, формирующихся на уровне низшего и высшего напряжения переменного тока (Рис. 5), и со стороны напряжения постоянного тока (Рис. 6). Представленные на рисунках графики токов и напряжений для одной из фаз получены для условий включения системы на нагрузку для интервала времени, соответствующего двум периодам – 0,04 с.

Представленная модель позволяет выполнить расчет системы накопления для различных режимов работы системы тягового электроснабжения постоянного тока:

- параметров системы накопления для заданных условий работы тяговой нагрузки, в том числе выбор вида накопителя (включая гибридные системы и варианты топологии);
- параметров двунаправленных преобразователей системы накопления;
- структуры и алгоритмов системы управления преобразователями;

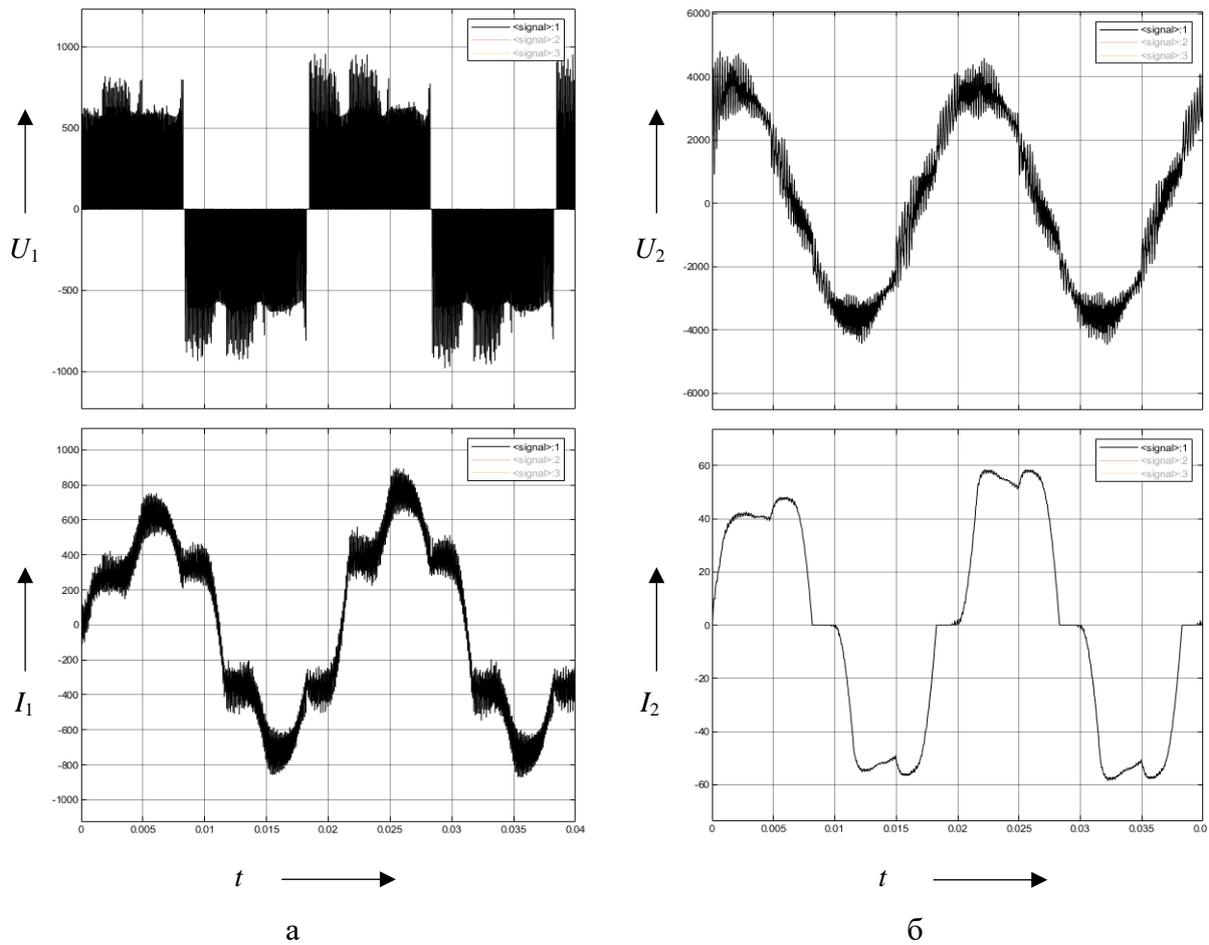


Рис. 5. Результаты моделирования работы преобразователя: токов и напряжений на стороне переменного тока низшего (а) и высшего (б) напряжения

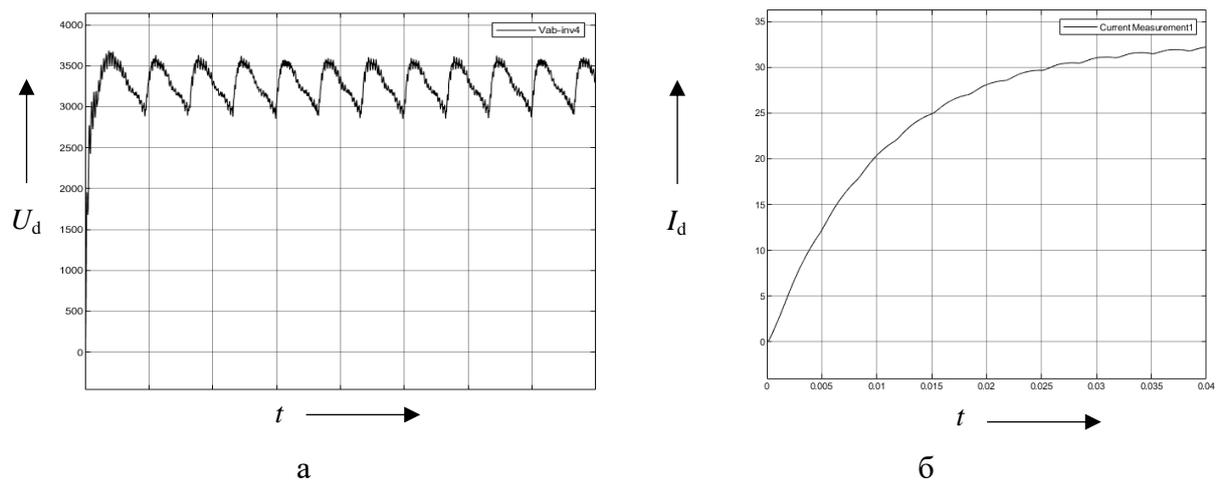


Рис. 6. Результаты моделирования работы преобразователя на стороне контактной сети: напряжения (а) и тока (б)

- фильтров для оценки качества электроэнергии на выходе системы накопления;
- силового трансформатора;
- уставок релейной защиты и автоматики;
- параметров системы заземления.

Модель системы накопления электроэнергии, соответствующая условиям подключения к контактной сети переменного тока (Рис. 2, б) для режима разряда системы накопления на электротяговую нагрузку, приведена на Рис. 7.

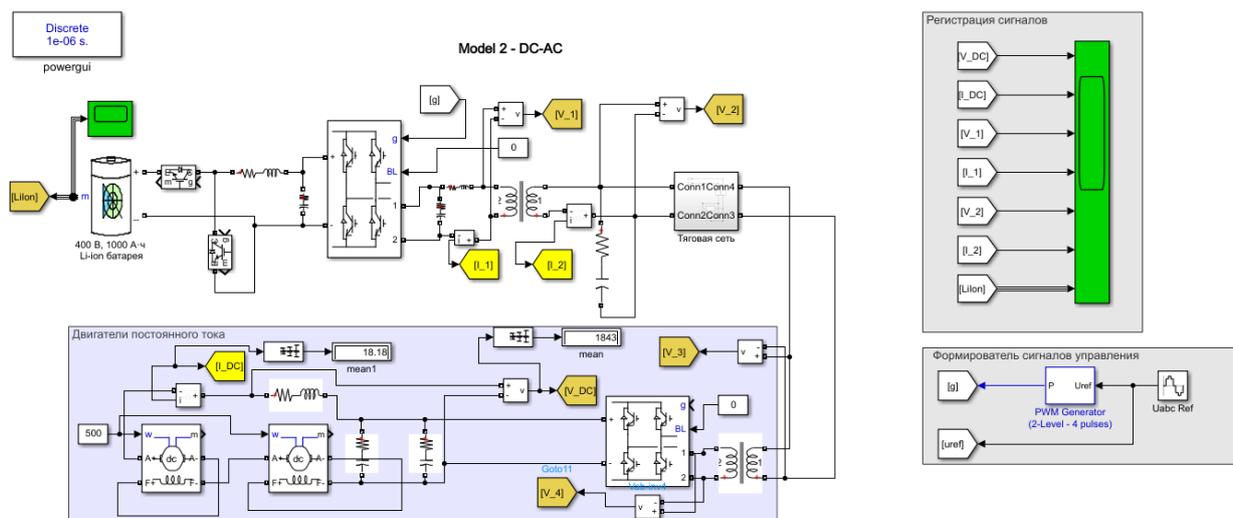


Рис. 7. Модель системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении переменного тока для режима разряда

Результаты моделирования токов и напряжения на выходе системы накопления электроэнергии на основе разработанной модели приведены на Рис. 8, на выходе однофазного тягового выпрямителя, работающего на двигатели постоянного тока на Рис. 9.

Разработанная модель системы накопления электроэнергии для системы тягового электроснабжения переменного тока позволяет выполнить апробацию расчетов по определению параметров элементов, входящих в систему (накопитель электроэнергии; преобразователь; силовой трансформатор; алгоритмы системы управления; топология системы накопления; сглаживающих устройств и др.).

Алгоритмы управления режимами работы систем накопления определяются решаемой задачей, а для гибридных систем должны дополнительно учитывать распределение мощности между различными накопителями.

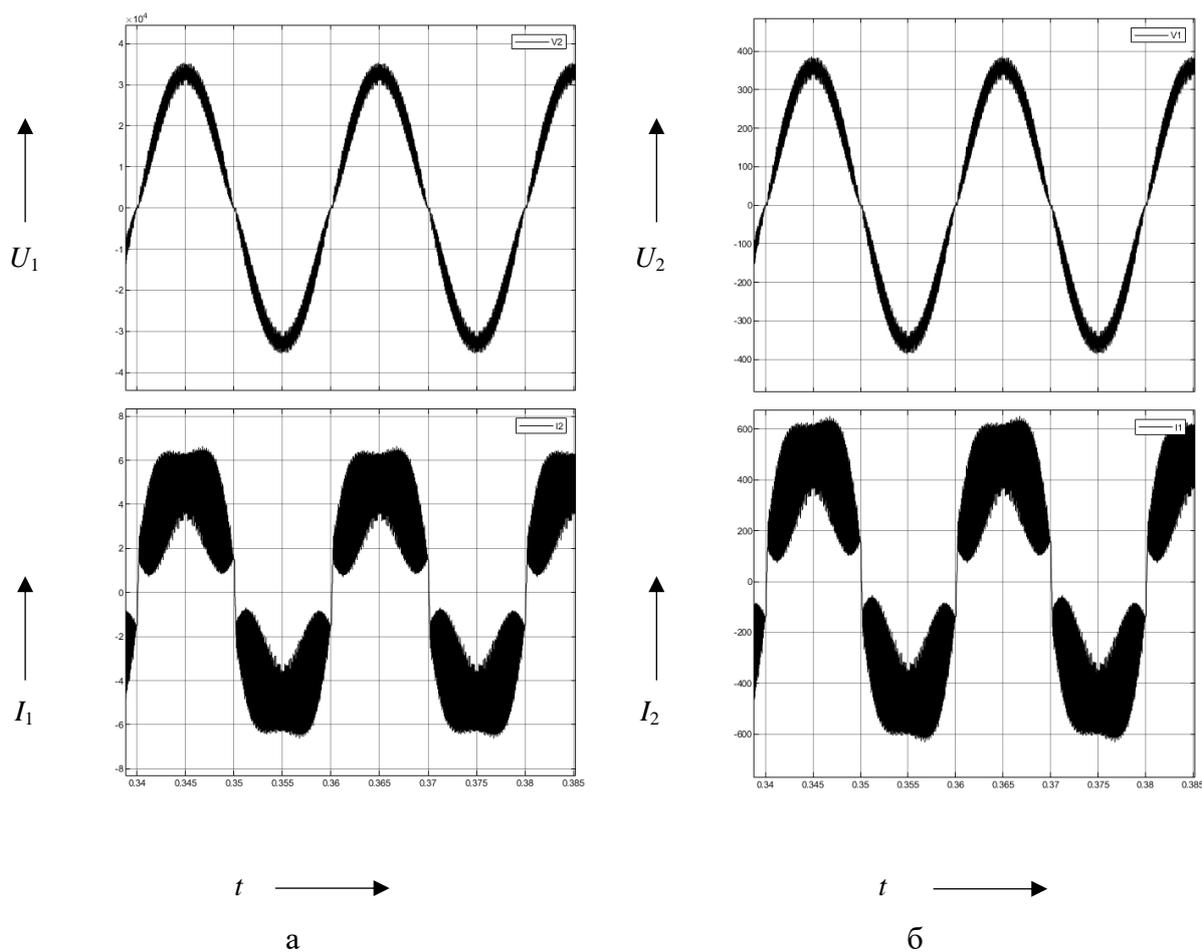


Рис. 8 Результаты моделирования работы преобразователя: токов и напряжений на стороне переменного тока высшего (а) и низшего (б) напряжения

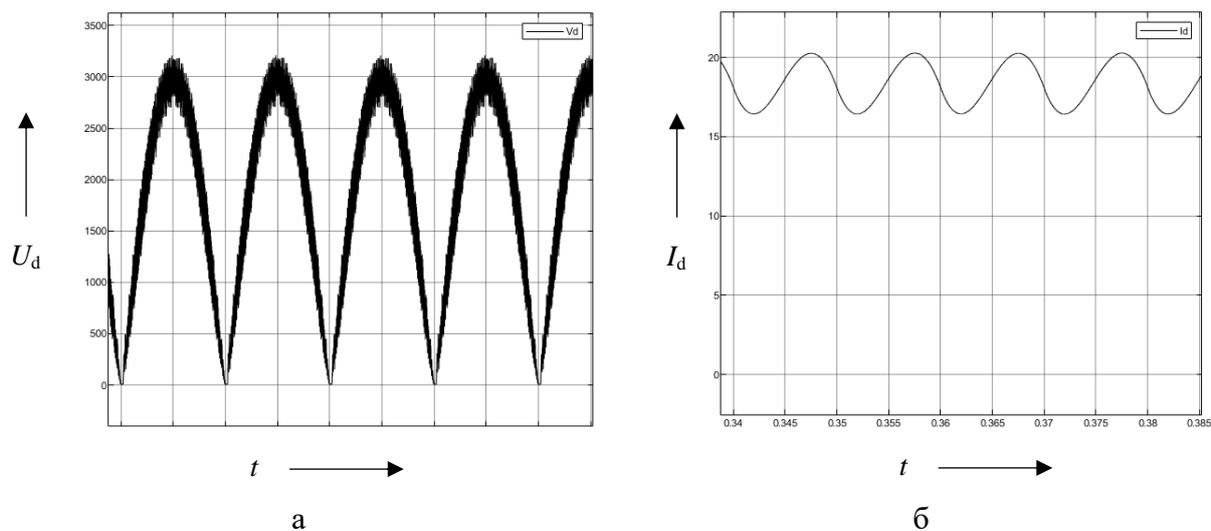


Рис. 9 Результаты моделирования работы преобразователя на электроподвижном составе: напряжения (а) и тока (б)

В качестве примера можно привести задачу стабилизации напряжения на посту секционирования, для решения которой внешняя характеристика системы накопления должна корректироваться с учетом уровней напряжения на шинах и тяговой нагрузки смежных подстанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи, стоящие перед системами накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении, определяют места их размещения, схемные решения и энергетические параметры. Количество преобразователей систем накопления определяется с учетом специфики систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, в том числе и для гибридных систем, для которых количество определяется реализуемой топологией.

Полученные в части разработки моделей систем накопления электроэнергии для тягового электроснабжения результаты ориентированы в дальнейшем на решение задач, связанных с отработкой способов управления режимами работы, алгоритмов систем управления преобразователями, выбора топологии гибридных систем накопления, апробации параметров силового оборудования, сглаживающих устройств и согласования условий и режимов работы системы тягового электроснабжения с тяговой нагрузкой электроподвижного состава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00002 <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>

Авторы заявляют что:

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю. и др. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. – 2020. – № 6(148). – С. 76–87. [Zyryanov VM, Kiryanova NG, Korotkov IY, et al. Energy storage systems: russian and international experience. *Energy Policy*. 2020;6(148):76-87. (In Russ.)]. doi: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76
2. Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О. и др. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 12(143). – С. 157–168. [Voropaj NI, Ukolova EV, Gerasimov DO, et al. Issledovanie mul'tienergeticheskogo ob"ekta metodami imitacionnogo

- modelirovaniya. *iPolytech Journal*. 2018;22.12(143):157-168. (In Russ.)). doi: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168
3. Сердюкова Е.В. Принципы преобразования в интегрированной энергетической системе при применении концепции энергетического хаба // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 88–96. [Serdyukova EV. Principy preobrazovaniya v integrirovannoj energeticheskoj sisteme pri primenenii koncepcii energeticheskogo haba. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021;24.3:88-96. (In Russ.)). doi: 10.22213/2413-1172-2021-3-88-96
 4. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е. Исследование режимов работы системы электроснабжения с ТОТЭ на биогазе // Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов XL сессии научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования», Новочеркасск, 25–26 сентября 2018 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2018. – С. 29–33. [Sosnina EN, Shaluhov AV, Veselov LE. Issledovanie rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya s TOTE na biogaze. *Kibernetika energeticheskikh sistem: Sbornik materialov XL sessii nauchnogo seminar po tematike "Diagnostika energooborudovaniya"*, Novocherkassk, 25–26 sentyabrya 2018 goda. Novocherkassk: *YUzhno-Rossiyskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova*, 2018:29-33. (In Russ.)). Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: https://www.npi-tu.ru/science/activities/konferentsii/conf_archive/assets/Kibernetika_2018.pdf
 5. Шалухо А.В., Липужин И.А., Шароватов Р.А. Разработка алгоритма управления и Simulink-модели автономной системы электроснабжения с ТОТЭ на биогазе // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы XII Международной научно-технической конференции, Нижний Новгород, 16–19 мая 2022 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. 94–97. [Shaluhov AV, Lipuzhin IA, Sharovатов RA. Razrabotka algoritma upravleniya i Simulink-modeli avtonomnoj sistemy elektrosnabzheniya s TOTE na biogaze. *Elektroenergetika glazami molodezhi: Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Nizhnij Novgorod, 16–19 maya 2022 goda. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva, 2022:94-97. (In Russ.)).
 6. Ян Ю., Соломин Е.В., Сюе Ж. и др. Исследование МРРТ-управления горизонтально-осевой ветроэнергетической установкой // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 48–61. [An Yu, Solomin EV, Syue ZH, et al. Horizontal axis wind turbine МРРТ-control research. *Power supply*. 2020;1:48-61. (In Russ.)). Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43871879>
 7. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Имитационная модель фотодизельной системы электроснабжения с интеллектуальным управлением в matlab/simulink // Омский научный вестник. – 2021. – № 4(178). – С. 52-62. [Lukutin BV, Murav'ev DI. Imitacionnaya model' fotodizel'noj sistemy elektrosnabzheniya s intellektual'nym upravleniem v matlab/Simulink. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2021;4(178):52-62. (In Russ.)). doi: 10.25206/1813-8225-2021-178-52-62
 8. Lukutin BV, Murav'ev DI. Optimization of operational control of autonomous photo-diesel power supply system with DC bus. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333.4:224-235. doi: 10.18799/24131830/2022/4/3619
 9. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Использование сегментированной статической

- характеристики по частоте для поддержания уровня заряда системы накопления электроэнергии // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 5(68). – С. 44–53. [Ilyushin PV, Shavlovskij SV. Ispol'zovanie segmentirovannoj staticheskoy harakteristiki po chastote dlya podderzhaniya urovnya zaryada sistemy nakopleniya elektroenergii. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2021;5(68):44-53. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: https://www.eriras.ru/files/_ilyushin_5_68_2021_eepir_verstka_final.pdf
10. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Механизмы окупаемости инвестиций в системы накопления электрической энергии при их использовании для снижения пиковых нагрузок и затрат на мощность // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 1(42). – С. 12–20. [Ilyushin PV, Shavlovskij SV. Mekhanizmy okupaemosti investicij v sistemy nakopleniya elektricheskoy energii pri ih ispol'zovanii dlya snizheniya pikovyh nagruzok i zatrat na moshchnost'. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2021;1(42):12-20. (In Russ.)]. Доступно по: https://www.eriras.ru/files/statya_ilyushin_shavlovskiy._mekhanizmy_okupaemosti_snee.pdf Ссылка активна на: 02.10.2022.
 11. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Принципы построения систем управления гибридными СНЭЭ на основе детерминированного подхода в изолированных промышленных энергорайонах // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 3(48). – С. 32–42. [Ilyushin PV, Shavlovskij SV. Principy postroeniya sistem upravleniya gibridnymi SNEE na osnove determinirovannogo podhoda v izolirovannyh promyshlennyh energorajonah. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2022;3(48):32-42. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: https://www.eriras.ru/files/_statya_ilyushin_shavlovskiy_final.pdf
 12. Булатов Ю.Н. Крюков А.В., Нгуен В.Х. Применение накопителей энергии и управляемых установок распределенной генерации для снижения провалов напряжения в сетевом энергетическом кластере // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2(38). – С. 38–43. [Bulatov YuN, Kryukov AV, Nguen VH. Primenenie nakopitelej energii i upravlyaemyh ustanovok raspredelennoj generacii dlya snizheniya provalov napryazheniya v setevom energeticheskom klasterere. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018;2(38):38-43. (In Russ.)]. doi: 10.18324/2077-5415-2018-2-38-43
 13. Шевлюгин М.В., Голицына А.Е., Стадников А.Н. Опытная эксплуатация накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях Московского метрополитена // Электропитание. – 2019. – № 4. – С. 51–60. [Shevlyugin MV, Golicyna AE, Stadnikov AN. Opytnaya ekspluataciya nakopitelej energii neupravlyaemogo tipa na tyagovyh podstanciyah Moskovskogo metropolitena. *Elektropitanie*. 2019;4:51-60. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42851490>
 14. Валинский О.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 8–11. [Valinskiy OS, Evstafev AM, Nikitin VV. To the question of determining the capacity of the energy storage for traction rolling storage of railways. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2021;2:8-11. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47379511>
 15. Незевак В.Л., Плотников Ю.В., Шатохин А.П. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 33–37. [Nezevak VL,

- Plotnikov YV, Shatohin AP. Modeling of work processes hybrid drive power on the physical model. Part 1. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2020;1:33-37. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.10.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42492382>
16. Sauer DU, Wenzl H. BATTERIES. Lifetime Prediction. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. 2009;522-538. doi: 10.1016/b978-044452745-5.00852-2
 17. Keil P, Jossen A. Impact of Dynamic Driving Loads and Regenerative Braking on the Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Journal of the electrochemical society*. 2017;164(13):3081-3092. doi: 10.1149/2.0801713jes
 18. Дубицкий М.А., Рыкова А.А. Классификация резервов мощности электроэнергетических систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 8(91). – С. 141–147. [Dubickij MA, Rykova AA. Klassifikaciya rezervov moshchnosti elektroenergeticheskikh sistem. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;8(91):141-147. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Незевак Владислав Леонидович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 8626-0883; ORCID: 0000-0002-1205-1994;
E-mail: nezevakwl@mail.ru

Дмитриев Александр Дмитриевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 6503-3961; ORCID: 0000-0003-3593-0737;
E-mail: alexandrorado@mail.ru

Information about the authors:

Vladislav L. Nezevak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 8626-0883; ORCID: 0000-0002-1205-1994;
E-mail: nezevakwl@mail.ru

Dmitriev Aleksandr Dmitrievich, aspirant;
eLibrary SPIN: 6503-3961; ORCID: 0000-0003-3593-0737;
E-mail: alexandrorado@mail.ru

Цитировать:

Незевак В.Л., Дмитриев А.Д. Имитационные модели и варианты применения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 74–90. doi: 10.17816/transsyst20228474-90

To cite this article:

Nezevak VL, Dmitriev AD. Simulation models and application options of electric power storage systems in traction power supply. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):74-90. doi: 10.17816/transsyst20228474-90

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

УДК [UDC] 629.439
DOI10.17816/transsyst20228491-106

© **К.К. Ким, И.М. Карпова**

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

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПОДВЕСА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Цель: выработать рекомендации по разработке оптимальных конструктивных схем систем из постоянных магнитов, предназначенных для создания силы подвеса.

Методы: электромагнитное взаимодействие в системе описывалось с помощью классической теории поля, использовался принцип суперпозиции, расчет сил выполнялся с помощью метода зеркальных отображений и квадратурных формул Чебышева.

Результаты: увеличение количества рядов магнитов с чередующейся полярностью приводит к возрастанию результирующей напряженности размагничивающего поля, а в случае без чередования полярностей наблюдается обратный эффект. Сила подвеса достигает максимума при определенном расстоянии между рядами из постоянных магнитов. Боковая сила в системе подвеса горизонтального типа достигает максимума при определенной величине поперечного смещения. Регулировка несущей способности подвеса изменением размеров поперечных сечений постоянных магнитов сопровождается увеличением расхода их магнитного материала. Наличие ферромагнитной шины значительно улучшает характеристики подвеса и благотворно влияет на устойчивость подвеса.

Заключение: целесообразно использование многорядных структур на путевом полотне и на экипаже с определенным шагом установки магнитных полос с чередующейся полярностью, причем на величину электромагнитных сил влияет расстояние между полосами. Выбор размеров поперечного сечения постоянных магнитов должен осуществляться с учетом конкретных требований к системе подвеса, принимая во внимание обратимость процесса перемагничивания.

Ключевые слова: постоянный магнит, магнитный подвес, экипаж, путевое полотно, многорядная структура, перемагничивание.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

©**К.К. Kim, I.M. Karpova**

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

ON THE ISSUE OF THE DEVELOPMENT OF PERMANENT MAGNET SUSPENSION SYSTEMS FOR TRANSPORT SYSTEMS

Aim: to develop recommendations for the development of optimal design schemes of permanent magnet systems designed to create a suspension force.

Methods: we described the electromagnetic interaction in the system using classical field theory, the principle of superposition was used, the forces were calculated using the method of mirror images and Chebyshev quadrature formulas.

Results: an increase of the number of rows of magnets with alternating polarity leads to an increase in the resulting strength of the demagnetizing field and there is the opposite effect in the case without alternating polarities. The suspension force reaches its maximum at a certain distance between the rows of permanent magnets. The side force reaches a maximum at a certain amount of transverse displacement in the horizontal suspension system. The control of the loading capacity of the suspension by changing the size of the cross sections of permanent magnets is accompanied by an increase their mass of the magnetic material. The presence of a ferromagnetic buss significantly improves the characteristics of the suspension and has a beneficial effect on the stability of the suspension.

Conclusion: it is advisable to use multi-row structures on the track and on the vehicle with a certain step of installing magnetic rows with alternating polarity and the distance between the rows affects the magnitude of electromagnetic forces. The choice of the cross-sectional dimensions of permanent magnets should be carried out taking into account the specific requirements for the suspension system, taking into account the reversibility of the remagnetization process.

Key words: permanent magnet, magnetic suspension, vehicle, track, multi-row structure, remagnetization.

ВВЕДЕНИЕ

Сфера использования магнитного подвеса, в котором левитация экипажа осуществляется с помощью постоянных магнитов (ПМ), установленных как на экипаже, так и на путевом полотне, в основном ограничивается промышленным и низкоскоростным пассажирским транспортом. Однако, возможно использование такого типа магнитного подвеса и при высоких скоростях движения в комбинации с электромагнитным или электродинамическим подвесом. В последнем случае функционирование магнитного подвеса на ПМ предполагается на участках стоянки, разгона и торможения[1]. Весьма интересно предложение по применению магнитной сборки Хальбаха, в этом случае параллельно решается задача обеспечения требуемого уровня магнитного поля в пассажирском салоне экипажа [2].

К наиболее общим требованиям к ПМ, употребляемым в таких системах подвеса, можно отнести следующие: всепогодность, сохранение работоспособности и стабильности характеристик в магнитных полях (в условиях размагничивания) и в широком интервале температур окружающей среды. В свете этих требований наиболее приемлемыми

являются ПМ, изготавливаемые из $BaFe$ и $SrO \cdot 6Fe_2O_3$, из-за их сравнительно низкой стоимости в сочетании с высокими магнитными качествами. Особо следует отметить ПМ на основе редкоземельных элементов, в частности $SmCo_5$ и $NdFeB$, обладающих значительно лучшими магнитными характеристиками в сравнении с $BaFe$.

Известно, что при колебаниях температуры кривая намагничивания вещества ПМ «деформируется» и положение рабочей точки изменяется. По условию обратимости процессов перемагничивания при изменении температуры окружающей среды рабочая точка не должна попадать в зону колена кривой намагничивания или ниже ее. При анализе работоспособности ПМ необходимо помнить, что на них в системе подвешивания размагничивающе воздействуют собственное и внешнее магнитные поля, величина которых зависит от размеров магнитов и их основных магнитных характеристик.

Если рассмотреть ПМ с прямоугольным поперечным сечением с размерами: a и h , то можно определить допустимую величину отношения этих размеров $\nu = a/h$ с учетом температуры окружающей среды:

$$\left| \frac{q(J_r - \chi_r H_{ZBH})}{qH_{ZBH} + I_r} \right| \geq \operatorname{tg} \alpha_{\text{п}},$$

где J_r – остаточная намагниченность, χ_r – реверсивная восприимчивость магнитного материала, H_{ZBH} – вертикальная составляющая напряженности внешнего поля, в котором находится ПМ, $\alpha_{\text{п}}$ – предельно допустимый угол наклона линии нагрузки, q – коэффициент, определяемый по формуле $q = J/H_{\text{ср.}\Delta V}$, где $H_{\text{ср.}\Delta V}$ – среднее значение напряженности магнитного поля в объеме ΔV [3].

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В системах подвеса, как правило, находят применение многорядные магнитные системы, в которых ПМ в виде магнитных полос работают в режимах отталкивания и притягивания. На Рис. 1 приведены схемы расположения рядов ПМ в магнитных системах: горизонтального (ПМГ) и вертикального типов [4–8].

На Рис. 1 б, в, г для уменьшения потоков рассеяния магнитные полосы расположены на ферромагнитных шинах (ФШ).

Для случаев, показанных на Рис. 1 при различных значениях зазора δ и относительного смещения \tilde{y} магнитных систем в каждой элементарной зоне сечения магнитной полосы вектора \mathbf{H}_R и \mathbf{I} параллельны.

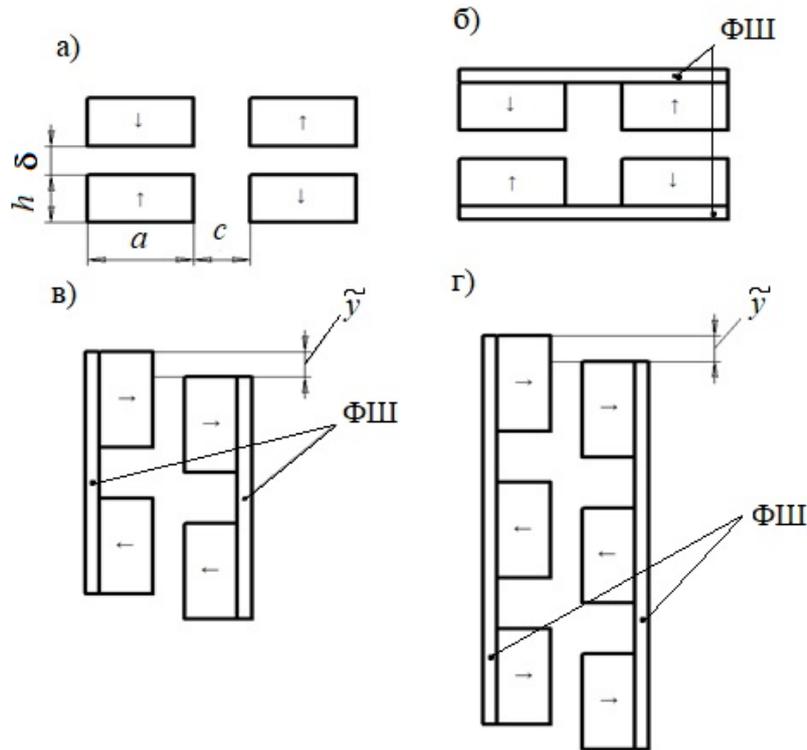


Рис. 1. Магнитные системы горизонтального (а, б) и вертикального типа (в, г)

Поэтому результирующую напряженность H_R размагничивающего магнитного поля можно определить следующим образом:

$$H_R = \frac{0,95J_r}{x_r \cdot \int_{i \cdot \Delta y}^{(i+1) \cdot \Delta y} dy \int_{k \cdot \Delta z}^{(k+1) \cdot \Delta z} H_z \cdot dz} + H_{ZBH}, \quad (1)$$

здесь H_{ZBH} – результирующая напряженность внешнего магнитного поля, создаваемого всеми магнитами, системы, за исключением рассматриваемого, она направлена по оси намагничивания; остальные обозначения поясняются Рис. 2.

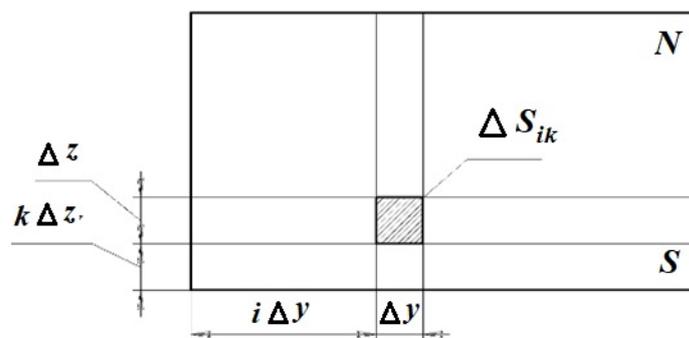


Рис. 2. Расчетная схема ПМ

Работа магнита носит обратимый характер, если выполняется условие:

$$|H_{Z\text{собств}} + H_{ZBH}| \leq |H_{\text{пер}}|,$$

где $H_{Z\text{собств}}$ – напряженность собственного размагничивающего поля. В (1) ей отвечает первое слагаемое; $H_{\text{пер}}$ – напряженность магнитного поля, которой соответствует начало перегиба кривой размагничивания.

В рамках линейной постановки при определении напряженности внешнего магнитного поля можно использовать принцип суперпозиции, т.е. суммировать напряженности магнитных полей, создаваемых в рассматриваемой области каждой «заряженной» гранью всех ПМ системы. Результаты расчетов показали, что существуют «опасные» зоны сечения магнитной полосы с точки зрения их размагничивания при значениях зазора δ , равных номинальному. Выявлено, что минимально допустимое значение $v = h/a$, определяющее оптимальные размеры магнитов, зависит от величины $\lambda = |H_{\text{пер}}| / J_r$.

При переходе от однорядной к многорядной магнитной системе, в которой полярность граней чередуется, существенно возрастает H_R . Однако при установке магнитных полос без чередования полярностей наблюдается и обратный эффект. Например, переход от одной к трем полосам с чередованием полярностей приводит к увеличению H_R примерно в 1,5 раза в середине поверхности центрального магнита и к уменьшению H_R в 2 раза при отсутствии чередования полярностей [9].

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПМ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НЕФЕРРОМАГНИТНУЮ ОСНОВУ, ПРИ СТОЯНКЕ ЭКИПАЖА

Рассматривается случай, когда ПМ установлены на путевом полотне и экипаже.

Электромагнитное взаимодействие ПМ может быть описано с помощью классической теории поля. Предположим, что ПМ имеют прямоугольную форму сечения, а вектор намагниченности постоянен по всему объему магнитов ($\mathbf{J} = \text{const}$).

Рассмотрим простейший пример – пару отталкивающихся ПМ (Рис. 3). Введем в рассмотрение фиктивные магнитные заряды вместо полюсных поверхностей (Рис. 3а). На Рис. 3б – расчетная схема, на которой изображены две «заряженные» грани. Плотность фиктивных магнитных зарядов $\sigma_m = \pm \mu_0 J$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

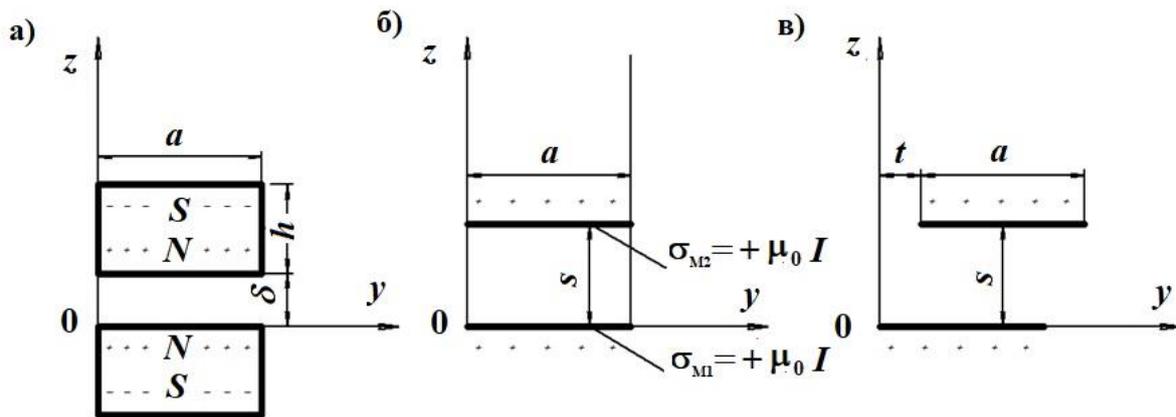


Рис. 3. Представление полюсных поверхностей слоями фиктивных магнитных зарядов

В [3] приводятся результаты решения уравнения Лапласа для скалярного потенциала $\Delta\varphi = 0$ для двумерного поля, созданного плоскостью с равномерно распределенным на ней зарядом [3, 10–14].

z и y -составляющие напряженности магнитного поля можно найти по формулам $H_z = -\nabla_z\varphi$ и $H_y = -\nabla_y\varphi$, можно найти:

$$H_z = -\frac{\sigma_{M1}}{2\pi\cdot\mu_0} \left(\operatorname{arctg}\frac{y}{z} - \operatorname{arctg}\frac{y-a}{z} \right),$$

$$H_y = -\frac{\sigma_{M1}}{4\pi\cdot\mu_0} \left\{ \ln(y^2 + z^2) - \ln[(a-y)^2 + z^2] \right\}.$$

Вертикальная (сила подвеса) и горизонтальная составляющие силы взаимодействия граней единичной длины равны

$$f_z = \sigma_{M2} \int_t^{t+a} H_z dy, \quad f_y = \sigma_{M2} \int_t^{t+a} H_y dz,$$

и после интегрирования примут вид (при $\sigma_{M1} = \sigma_{M2} = \sigma$)

$$f_z = \frac{\sigma_M^2}{2\pi\cdot\mu_0} \left\{ (t+a) \operatorname{arctg}\frac{t+a}{s} - 2t \operatorname{arctg}\frac{t}{s} + (t-a) \operatorname{arctg}\frac{t-a}{s} + \frac{s}{2} \ln \frac{(s^2+t^2)}{[s^2+(t-a)^2][s^2+(t+a)^2]} \right\},$$

$$f_y = \frac{\sigma_M^2}{4\pi\cdot\mu_0} \left\{ 2S \left(\operatorname{arctg}\frac{t+a}{s} - 2 \operatorname{arctg}\frac{t}{s} + \operatorname{arctg}\frac{t-a}{s} \right) + (t+a) \ln[(t+a)^2 + S^2] - 2t \ln(t^2 + S^2) + (t-a) \ln[(t-a)^2 + S^2] \right\}.$$

Можно говорить о целесообразности использования в системах магнитного подвеса многорядных структур на путевом полотне и на экипаже с определенным шагом установки магнитных полос с чередующейся полярностью. В этом случае величина силы подвеса f_z , приведенная к одной паре полос путевого полотна и экипажа, значительно возрастает и может быть описана формулой:

$$f_{z,n} = 2\pi \sum_{j=0}^{j=2} \frac{(-1)^j}{j!(2-j)!} \cdot f_z(\tilde{y}, \delta + jh) + 4 \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=0}^{j=2} (-1)^{i+j} \frac{(n-i)}{j!(2-j)!} \cdot f_z[i(a+c) + \tilde{y}, \delta + jh],$$

где \tilde{y} – относительное боковое смещение магнитов путевого полотна и экипажа; c – расстояние между соседними рядами (полосами). Рис. 4 иллюстрирует характер изменения силы $f_{z,n}$ с ростом количества полос (n).

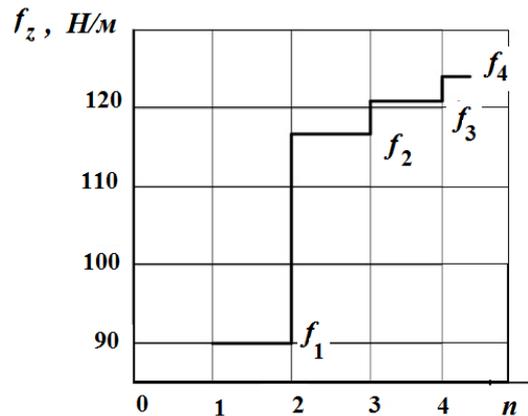


Рис. 4. Зависимость силы подвеса от количества полос

Боковая сила определяется выражением:

$$f_{y,n} = 2n \sum_{j=0}^2 \frac{(-1)^j}{j!(2-j)!} f_y(\tilde{y}, \delta + jh) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (1)^{i+j} \{f_y[i(a+c) + \tilde{y}, \delta + jh] - f_y[i(a+c) - \tilde{y}, \delta + jh]\} \frac{n-i}{j!(2-j)!}.$$

При установке магнитных полос на путевом полотне и на экипаже необходимо учитывать зависимость $f_{z,n}$ и $f_{y,n}$ от расстояния между полосами. Анализ силы подвеса $f_{z,n}$ показал, что она при вариациях a и h в широких пределах достигает максимума при $c \approx 0,01$ м.

Оценить качество магнитного подвеса можно с помощью показателей эффективности (q_1) и устойчивости подвешивания (q_2), которые определяются следующим образом: $q_1 = f_z / P$ и $q_2 = f_z / f_y$, где P – вес ПМ. Показатель эффективности предоставляет возможность контролировать «качество» системы подвеса при нахождении её параметров для конкретного случая. Этот показатель и показатель устойчивости могут быть взяты в качестве целевых функций при решении задач по оптимизации. Расчеты показали, что для ПМГ при $\delta = 10$ мм показатель эффективности составляет 10, а при $\delta = 7,5$ мм – $q_1 \approx 12-13$.

Естественно, что при разработке систем магнитного подвеса такого рода необходимо стремиться к достижению высоких значений q_1 и q_2 .

Выбор размеров a и h должен осуществляться в каждом конкретном случае с учетом требований, предъявляемых к системе подвеса. Одновременно с этим необходимо осуществлять контроль размеров ПМ, принимая во внимание обратимость процесса перемагничивания.

В зависимости боковой силы, действующей на экипаж, от его бокового смещения, в системе с ПМГ наблюдается максимум. После достижения максимума боковая сила начинает уменьшаться, однако этот случай выходит за рамки реально допустимых \tilde{y} (Рис. 5). На Рис. 6 показаны «кривые сползания» ПМ, иллюстрирующие уменьшение зазора δ с ростом \tilde{y} .

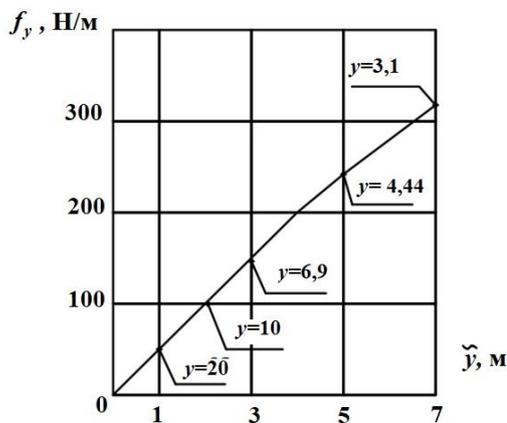


Рис. 5. Зависимость боковой силы от бокового смещения

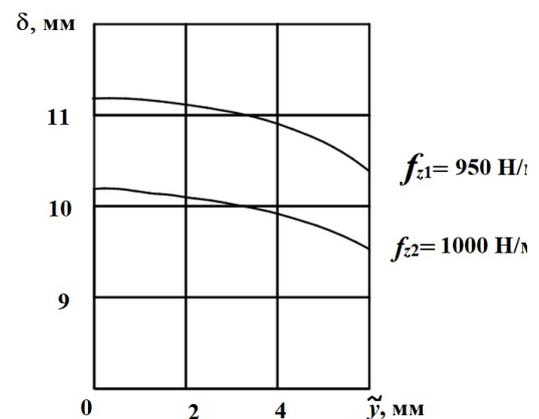


Рис. 6. Зависимости величины воздушного зазора от бокового смещения

Иногда целесообразно использовать на путевом полотне и на экипаже ПМ разных размеров ($a_1 \times h_1$ и $a_2 \times h_2$). В этом случае формулы для вертикальной и боковой сил принимают вид:

$$f_z = \frac{\mu_0 J^2}{2\pi} \int_{-\frac{1}{2}(a_2-a_1)+\tilde{y}}^{\frac{1}{2}(a_1+a_2)+\tilde{y}} \left(\arctg \frac{y}{\delta+h_2} - \arctg \frac{y}{\delta} + \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_1+h_2} - \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_1} - \arctg \frac{y}{\delta+h_1+h_2} + \arctg \frac{y}{\delta+h_1} - \arctg \frac{y-a_1}{\delta+h_2} + \arctg \frac{y-a_1}{\delta} \right) dy,$$

$$f_y = \frac{\mu_0 J^2}{2\pi} \int_{\delta}^{\delta+h_2} \left[\arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_1+a_2)}{z} - \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z} + \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2+a_1)}{z+h_1} + \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z+h_1} - \arctg \frac{\tilde{y}+\frac{1}{2}(a_2-a_1)}{z} + \arctg \frac{\tilde{y}-\frac{1}{2}(a_2+a_1)}{z} \right] dz.$$

В результате анализа этих зависимостей можно говорить, что f_z достигает максимума при изменении a_2 ($a_2 \neq a_1$) при $f_z = f_{z\max}$. Сравнение показателей эффективности $q_{1(1)}$ и $q_{1(2)}$ показывает, что $q_{1(1)}$ достигает значений, заметно бóльших нежели $q_{1(2)}$, а так же $q_{1(2)\max}$, определяемом при

данном h_2 . Например, при $\delta = 7,5$ мм, $a_2 = 40$ мм, $h_2 = 45$ мм имеем $q_{1(1)} = 17,1$, $q_{1(2)} = 3,8$ и $q_{1(2)\max} = 5,0$. Если на экипаже установлены ПМ с размерами a_1 и h_1 , то их несущая способность будет достаточно высокой, но одновременно возрастает расход магнитного материала путевого ПМ. Возможен альтернативный вариант: можно установить магниты с размерами a_1 и h_1 на путевом полотне, тогда расход магнитного материала на путевом полотне значительно снизится, но упадет грузоподъемность системы. Поэтому решение по выбору размеров экипажных и путевых магнитов нужно принимать с учетом требований каждого конкретного случая.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭКИПАЖНЫХ И ПУТЕВЫХ ПМ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ФЕРРОМАГНИТНУЮ ОСНОВУ, ПРИ СТОЯНКЕ ЭКИПАЖА

При установке магнитных полос на путевые ферромагнитные шины (ФШ) вертикальная сила взаимодействия магнитных систем путевого полотна и экипажа возрастает, причем лучшим из возможных вариантов являются шины плоской формы. Они просты по конструкции, удобны при разработке конструкций путевого полотна и экипажа, их эксплуатация не требует значительных затрат.

Использование ФШ уменьшает потоки рассеяния, способствует концентрации магнитных полей в зоне рабочего зазора. Однако, наличие ФШ приводит к увеличению не только силы подвеса, но и боковой силы.

Силы f_z и f_y можно найти методом зеркальных отображений, для этого используется расчетная схема для одной пары полос (Рис. 7).

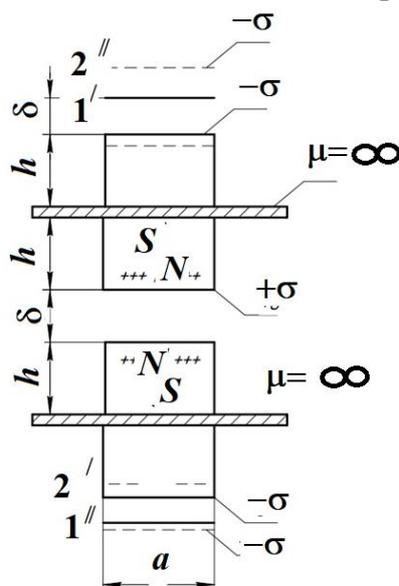


Рис. 7. Расчетная схема для метода зеркальных отображений

Здесь заряженным граням 1 и 2 соответствуют отображения, помеченные соответствующей цифрой со штрихом.

Принимаемые допущения:

1) относительная магнитная проницаемость вещества ФШ – бесконечно большая;

2) рассматриваются только первые отображения;

3) влиянием полей граней ПМ, находящихся на ФШ, пренебрегаем.

Выражение для силы подвеса n магнитных полос имеет следующий вид:

$$f_{z,n} = n \left[f_z(\tilde{y}, \delta) - 2f_z(\tilde{y}, \delta + 2h) - 2f_z(\tilde{y}, 2\delta + 2h) + f_z(\tilde{y}, \delta + 4h) + 2f_z(\tilde{y}, 2\delta + 2h) + \right. \\ \left. + f_z(\tilde{y}, 3\delta + 4h) \right] + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (-1)^i (n-i) \left\{ f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta) - 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 2h) - \right. \\ \left. - 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), 2\delta + 2h) + f_z(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 4h) + 2f_z(\tilde{y} + i(a+c), 2\delta + 4h) + f_z(\tilde{y} + i(a+c), 3\delta + 4h) \right\};$$

а боковая сила определяется следующей формулой:

$$f_{y,n} = n \left[f_y(\tilde{y}, \delta) - 2f_y(\tilde{y}, \delta + 2h) + f_y(\tilde{y}, \delta + 4h) - f_y(\tilde{y}, 3\delta + 4h) \right] + \\ + \sum_{i=1}^{n-1} (-1)^i (n-i) \left\{ f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta) - f_y(i(a+c) - \tilde{y}, \delta) + 2f_y(i(a+c) - \tilde{y}, \delta + 2h) - \right. \\ \left. - 2f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 2h) + f_y(\tilde{y} + i(a+c), \delta + 4h) - f_y(i(a+c) - \tilde{y}, 3\delta + 4h) + f_y(i(a+c) - \tilde{y}, 3\delta + 4h) - f_y(i(a+c) + \tilde{y}, 3\delta + 4h) \right\}.$$

Влияние ФШ обуславливает увеличение f_z и f_y , которое может достигать полуторного значения при определенных размерах сечения ФШ без учета ее массы ($m_{\text{ФШ}}$). Минимальная величина массы ФШ (для обеспечения требуемого силового взаимодействия) составляет, примерно, 25 % массы всех ПМ.

При увеличении высоты h сечения ФШ эффект от ее применения снижается, поэтому возникает вопрос об отыскании оптимального значения этого размера. В этом случае можно воспользоваться следующим критериальным условием:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}}}{f_z} > k \frac{m_{\text{ФШ}} + m_{\text{М}}}{m_{\text{М}}}, \quad (2)$$

где $f_{z,\text{ФШ}}$ и f_z – силы подвеса с ФШ и без нее, и $m_{\text{М}}$ – масса всех ПМ; k – коэффициент, усиливающий требования к целесообразности применения

ФШ ($k > 1$). Учитывая связь $m_{\text{ФШ}}$ с характеристиками и размерами ПМ, (2) можно придать вид:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}}}{f_z} > k \frac{\frac{\mu_0 \cdot J \cdot \rho_{\text{ФШ}}}{2\pi \cdot B_{\text{нас}}} \cdot \left(a + \frac{c}{2}\right) \left(\pi a + 2 \arctg \frac{a}{h} - h \ln \frac{a^2 + h^2}{h^2}\right) + \rho_M \cdot a \cdot h}{\rho_M \cdot a \cdot h},$$

где $\rho_{\text{ФШ}}$, ρ_M – плотности материалов ФШ и ПМ соответственно, $B_{\text{нас}}$ – индукция насыщения материала ФШ.

Для рассматриваемого критерия можно использовать и иное соотношение:

$$\frac{f_{z,\text{ФШ}} - m_M g - m_{\text{ФШ}} g}{f_z - m_M g} > 1.$$

Анализ характеристик ПМ затруднен из-за громоздкости выражений для f_x и f_y , причем трудоемкость расчетов возрастает по мере увеличения пар магнитных полос. Чтобы в какой-то мере избежать этого, можно использовать схемы замещения, тогда указанные силы можно определить так:

$$f_{z,n} = k_n \cdot f_z \quad \text{и} \quad f_{z,n\text{ФШ}} = k_{n,\text{ФШ}} \cdot f_z,$$

где k_n и $k_{n,\text{ФШ}}$ – коэффициенты замещения, определяемые для каждой пары значений a и h . Такое замещение приводит к появлению погрешности при определении сил подвеса, не превышающей 8 % в широком интервале изменения высоты подвеса.

Следует констатировать, что при пространственных перемещениях экипажа с помощью схем замещения нельзя значительно понизить сложность анализа силового взаимодействия в рассматриваемой системе подвеса.

Для двух произвольно ориентированных в пространстве ПМ потенциальная энергия равна:

$$E = \mu_0 I \int_0^b dx \int_{y + \left(x - \frac{b}{2}\right)\gamma}^{\left[y + a + \left(x - \frac{b}{2}\right)\gamma\right]} dy \int_{\delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi - \left(y - \frac{a}{2}\right)\alpha}^{\delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi - \left(y - \frac{a}{2}\right)\alpha} H_z dz,$$

где γ , φ и α – угловые перемещения ПМ вокруг вертикальной, горизонтальной поперечной и продольной осей соответственно. Производная E по любой из обобщенных координат дает соответствующую обобщенную силу.

Сила подвеса равна $F_z = \int_0^b f_z dx$, здесь аргумент f_z (под f_z понимается сила подвеса одной магнитной полосы многорядной системы) содержит величину $S = \delta + \left(x - \frac{b}{2}\right)\varphi$. Из-за громоздкости выражения для f_z , особенно при использовании ФШ, данное выражение целесообразно представить следующим образом $F_z = b \int_{-1}^1 f_z(\xi) d\xi$, где $\xi = \frac{2x}{b} - 1$. Затем при решении используются квадратурные формулы Чебышева, т. к. весовые коэффициенты в них одинаковы, а узлы симметричны относительно середины ПМ. Таким образом, распределенная сила, действующая на экипажный ПМ, заменяется на ряд сил, сосредоточенных в ξ_i узлах. Чтобы найти F_z , экипажный ПМ, ориентированный произвольно относительно путевого полотна, разбивается на $2n$ элементов одинаковой длины $b/2$. Далее каждая наклоненная часть относительно плоскости путевого полотна заменяется на магнит длиной $b/2$, который располагается горизонтально (экипажный магнит имеет форму «лестницы»). Отсюда подъемная сила равна

$$F_z = \sum_{K=1}^n f_z^{(\pm K)}.$$

При исследованиях силового взаимодействия ПМ, расположенных на путевого полотне экипажа, а также устойчивости подвеса последнего кроме главного вектора сил необходимо знать главный момент, действующий на экипаж. В случае пяти узлов в квадратурной формуле Чебышева он определяется следующим выражением:

$$M_y = (F_{z1} - F_{z5}) \frac{b}{2} |\xi_1| + (F_{z2} - F_{z4}) \frac{b}{2} |\xi_2|.$$

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ПУТЕВОГО ПОЛОТНА И ЭКИПАЖА

Данный вопрос приобретает особую актуальность в процессе создания и разработки транспортных систем. Здесь побудительной причиной является минимизация затрат ферромагнитного материала при сохранении требуемого значения подъемной силы f_z и величины рабочего зазора δ , что благотворно отражается на стоимости экипажа и путевого полотна.

Оптимизационная задача формулируется в зависимости от условий эксплуатации транспортной системы, ее габаритных размеров, технической возможности осуществления конструкции отдельных узлов и т.д.

За целевые функции могут быть взяты показатели эффективности $q_1 = f_z / mg$ и устойчивости $q_2 = f_z / f_y$. Учитывая, что в реальных магнитных системах боковые перемещения окажут весьма незначительное влияние на силу подвеса, в качестве целевой функции можно рассматривать нелинейную функцию $q_1 = q_1(\mathbf{x})$, где $\mathbf{X} = \{a, h, c\}$.

Количество компонент x_i варьируется в зависимости от конкретики задачи. Отыскание $\max\{q_1(\mathbf{x})\}$ заключается в поиске $\min\{-|q_1(\mathbf{x})|\}$, т.е. $\Phi(\mathbf{x}) = -|q_1(\mathbf{x})|$. Условия эксплуатации реальных транспортных систем рассматриваемого типа подсказывают численные ограничения, налагаемые на компоненты \mathbf{X} :

$$0 < a \leq 0,1 \text{ м}, 0 < h \leq 0,1 \text{ м}, c \geq 0.$$

Возможны и другие ограничения, диктуемые конкретикой задачи, например, количество магнитных полос, устанавливаемых на путевом полотне и экипаже, наличие ФШ и др.

В качестве первого шага оптимизации рассматривался самый простой случай - неподвижный экипаж. Тогда выбор оптимизационного метода существенно упрощается, если учесть, что их физическая сущность позволяет заметно сузить границы поиска, кроме того, количество компонент сравнительно невелико. В результате был выбран метод перебора с переменным шагом в окрестности точки \mathbf{x} минимума $\Phi(\mathbf{x})$. $\Phi(\mathbf{x})$ – выпуклая функция и, следовательно, имеет глобальный минимум.

Были рассмотрены задачи поиска $\max\{\mu_z(\mathbf{x})\}$ для ряда магнитных систем, например, одна пара взаимодействующих полос без ФШ; пара полос с чередующейся полярностью без ФШ; n пар полос с чередующейся полярностью с ФШ.

Осуществлялся поиск глобального экстремума $\mu_z(\mathbf{x})$ и определялись оптимальные значения x_{i0} при различных f_z , δ и J .

Выбор ограничивающего условия обусловливался тем обстоятельством, что величина взаимного размагничивающего действия магнитных полей зависит от величины минимально допустимого рабочего зазора. Это условие имеет вид:

$$\frac{1}{q + \chi_r} + \frac{0,95}{2\pi(1 + \chi_r / q)} \left(\arctg \frac{y}{z} + \arctg \frac{y-a}{z+h} - \arctg \frac{y}{z+h} - \arctg \frac{y-a}{z} \right) \leq \left| \frac{H_{\text{пер}}}{J_r} \right|,$$

где χ_r - магнитная восприимчивость материала ПМ, $z = \delta$. Результаты решения этого неравенства при $z = 0$ и $y = a/2$ приведены на Рис. 8.

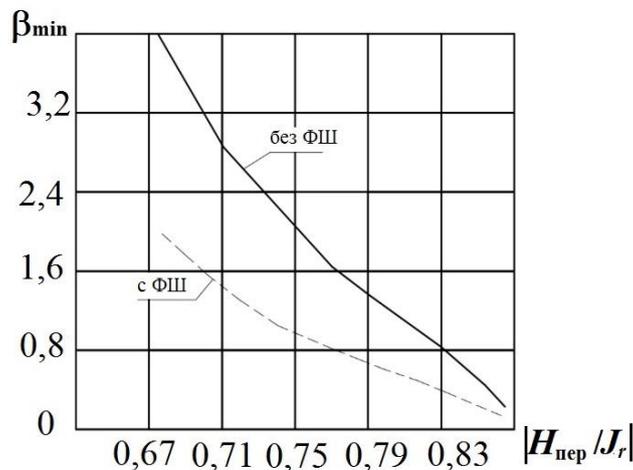


Рис. 8. Зависимость минимально допустимого отношения сторон сечения магнита от $|H_{пер} / J_r|$

Здесь по оси ординат отложена величина минимально допустимого отношения сторон сечения магнита $\beta = \beta_{min} = h/a$, удовлетворяющего рассматриваемому неравенству для вариантов с использованием ФШ и без нее. Как видно, важной характеристикой магнитного материала является: отношение $|H_{пер} / J_r|$, с его увеличением роль ограничивающего условия снижается. Наличие ФШ значительно улучшает характеристики подвеса, позволяет получать бóльшие значения $(a/h)_{max} = 1/\beta_{min}$. Большим значениям a/h свойственны высокие q_1 , при этом при $a > h$ экипаж ведет себя устойчивее в горизонтальной плоскости по сравнению со случаем $h > a$.

ВЫВОДЫ

1. Целесообразно использовать многорядные системы из постоянных магнитов, установленные как на экипаже, так и на путевом полотне. Магниты устанавливаются с чередованием полярности.
2. Увеличение количества рядов магнитов с чередующейся полярностью приводит к возрастанию результирующей напряженности размагничивающего поля, а в случае без чередования полярностей наблюдается обратный эффект.
3. Сила подвеса достигает максимума при определенном расстоянии между полосами из постоянных магнитов. Например, сила подвеса при вариациях размеров поперечного сечения ПМ в широких пределах достигает максимума при $c \approx 0,01$ м.

4. Поперечное смещение экипажных ПМ при горизонтальной схеме расположения приводит к уменьшению силы подвеса (вплоть до изменения ее направления) и возрастанию боковой силы, причем зависимость последней от поперечного смещения имеет максимум.
5. Наличие ферромагнитной шины не только значительно улучшает характеристики подвеса (силы взаимодействия экипажных и путевых ПМ при определенных размерах сечения магнитной полосы возрастают примерно в полтора раза), но и увеличивает устойчивость подвеса.
6. Использование ПМ с большими значениями отношения ширины к высоте магнита приводит не только к увеличению эффективности подвеса, но и к повышению устойчивости в горизонтальной плоскости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с. [Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogo podvesa i sverhprovodimosti*. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”; 2007. 360 p. (In Russ.)].
2. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с. [Zaitsev AA, Antonov YuF, editors. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problemi i tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. 612 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 02.02.2019. Доступно по: <https://b-ok.org/book/2910926/a2ce27>
3. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems*. Oxford: Pergamon Press; 1963. 376 p.
4. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: ВШ, 1986. – 240 с. [Demirchyan KS, Chechurin VL. *Mashinnye raschety elektromagnitnyh polej*. Moscow: VSh; 1986. 240 p. (In Russ.)].
5. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*. 2017;12(3):357-364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
6. Chin JC, Gray JS, Jones SM, Berton JJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida. doi:10.2514/6.2015-1587
7. Janzen R. Trans Pod Ultra-High-Speed Tube Transportation: Dynamics of Vehicles and Infrastructure. *Procedia Engineering*. 2017;199:8-17. doi:10.1016/j.proeng.2017.09.142
8. Beach AE. The Pneumatic Tunnel Under Broadway, NY. *Scientific American*. 1870;22(10):154-156. doi:10.1038/scientificamerican03051870-154
9. Oettershagen P. Perpetual flight with a small solar-powered UAV: Flight results, performance analysis and model validation. 2016. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016. doi: 10.1109/AERO.2016.7500855

10. Evstaf'ev AM, Nikitin VV, Telichenko SA. Energy Converters for Hybrid Traction Power Systems Used in Electric Transport. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:77-81. doi: 10.3103/S1068371220020042
11. Nikitin VV, Sychugov AN, Rolle IA, et al. Calculations of the Parameters and Simulation of the Operation of Nonlinear Surge Arresters for AC Rolling Stock. *Russ. Electr. Engin.* 2020;91:87-92. doi: 10.3103/S1068371220020078
12. Valinsky OS, Evstaf'ev AM, Nikitin VV. The Effectiveness of Energy Exchange Processes in Traction Electric Drives with Onboard Capacitive Energy Storages. *Russ. Electr. Engin.* 2018;89:566-570. doi: 10.3103/S1068371218100103
13. Nikitin VV, Marikin AN, Tret'yakov AV. Generator cars with hybrid power plants. *Russ. Electr. Engin.* 2016;87:260-265. doi: 10.3103/S1068371216050138
14. Baiko AV, Nikitin VV, Sereda EG. Autonomous power systems with synchronous generators and hydrogen energy sources. *Russ. Electr. Engin.* 2015;86:479-484. doi: 10.3103/S1068371215080027

Сведения об авторах:

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

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

Information about the authors:

Konstantin K. Kim Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;
E-mail: kimkk@inbox.ru

Irina M. Karpova Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN-код: 7820-7708; ORCID: 0000-0002-1197-0753
E-mail: legiero@mail.ru

Цитировать:

Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 91–106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106

To cite this article:

Kim KK, Karpova IM. On the issue of the development of permanent magnet suspension systems for transport systems. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2022;8(4):91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC] 625.5

DOI 10.17816/transsyst20228410-125

© А.Э. Юницкий, А.С. Хлебус, Е.А. Иванова, А.Е. Шашко, М.И. Цырлин
ЗАО «Струнные технологии»
(Минск, Республика Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС» ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГИБКОГО РЕЛЬСА В ЛЕГКИХ ЛИНИЯХ СТРУННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ uST

Обоснование: создание струнных рельс с низким погонным весом и высокими эксплуатационными характеристиками, определяющими долговечность, износостойкость, надежное сцепление колес транспортных средств с дорожкой качения рельса является актуальной задачей.

Цель: исследовать влияние геометрических параметров стального колеса и гибкого струнного рельса с полимерным покрытием на эксплуатационные характеристики; выбрать наиболее оптимальные параметры контактной пары "колесо-рельс".

Методы: расчет производился при помощи программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS.

Результаты: для уменьшения уровня контактных давлений целесообразнее уменьшить нагрузку на колесо либо увеличить ширину контакта, чем увеличивать радиус колеса; наиболее оптимальной является контактная пара, где модуль упругости полимерной головки рельса равен модулю упругости материала колеса, т. е. в контактной паре используются подобные по упругости материалы.

Ключевые слова: рельсо-струнная путевая структура, uST, струнный рельс, подвесной юнимобиль, контактная пара "колесо–рельс", моделирование, контактные напряжения, оптимизация параметров

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© A.E. Unitsky, A.S. Khlebus, E.A. Ivanova, A.E. Shashko, M.I. Tsyrlin
Unitsky String Technologies, Inc.
(Minsk, Republic of Belarus)

SIMULATION OF THE CONTACT PAIR “WHEEL–RAIL” OF THE EXPERIMENTAL DESIGN OF THE FLEXIBLE RAIL IN THE LIGHTWEIGHT TRACKS OF THE uST STRING TRANSPORT SYSTEM

Rationale: Development of string rails with low weight per meter and high-performance characteristics that determine durability, wear resistance, reliable grip of vehicle wheels to the rail rolling surface is a vital task.

Objective: to investigate impact of the geometric parameters of the steel wheel and the flexible string rail with a polymer coating on the performance characteristics; to choose the most optimal parameters of the contact pair “wheel-rail”.

Methods: The calculation was made using the ANSYS finite element analysis software package.

Results: in order to reduce the level of contact pressures, it is more expedient to lower the load on the wheel or increase the width of the contact, rather than to increase the radius of the wheel; the most optimal is the contact pair, where the modulus of elasticity of the polymer rail head is equal to the modulus of elasticity of the wheel material, that is, materials similar in elasticity are used in the contact pair.

Key words: string rail track structure, uST, string rail, suspended unimobile, contact pair “wheel-rail”, simulation, contact stresses, optimization of parameters

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших технологических элементов всех типов струнных транспортных систем uST является взаимодействие колеса юнимобилия со струнным рельсом [1]. Применяемые в uST типы струнных рельсов в зависимости от используемой путевой структуры разнообразны: жесткий рельс (ферма), полужесткий рельс, гибкий рельс [2]. В этой связи одной из актуальных задач для uST является разработка легкой линии с самым низким погонным весом (весом одного погонного метра путевой структуры) по сравнению с другими видами.

В качестве используемого материала для уменьшения веса конструкции рельса была предложена гипотеза использования альтернативного металлу материала – полимеров из полиуретановой группы. При такой замене материала обязательно необходимо сохранить высокие эксплуатационные характеристики гибкого рельса – долговечность, коррозионная стойкость, ремонтпригодность, износостойкость, надежное сцепление колес электромобилия с дорожкой качения рельса. В то же время, изготовление натурной модели из гипотетических материалов весьма затратно, в связи с чем на предварительном этапе целесообразнее произвести расчет и моделирование в программном приложении. Как подчеркивают многочисленные пользователи программного комплекса ANSYS Workbench [3–5], комплекс позволяет использовать значительное количество настроек для моделирования напряженно-деформированного состояния сложных конструкций в контактной зоне, при этом настройки позволяют использовать самые различные материалы и их комбинации.

В рамках решения вышеуказанной задачи требуется исследовать влияние геометрических параметров колеса и рельса на эксплуатационные

характеристики, непосредственно влияющие на долговечность и надежность рельса легких транспортных систем, выбрать наиболее оптимальные параметры контактной пары "колесо-рельс".

В этой связи предложено использовать плоскую струну в качестве гибкого рельса, состоящую из стальных проволок, собранных в один ряд и защищенных от внешнего воздействия полимерным составом (полиуретан). Данная конструкция гибкого рельса характеризуется низким удельным весом при относительно высоком усилии натяжения «струны» (на 1 кг/м.п. легкого рельса приходится около 9 тонн натяжения, что в 2 раза выше, чем при применении стандартных высокопрочных канатов, где на 1 кг/м.п. рельса допустимо не более 4,5 тонн натяжения), а также должна иметь значительное преимущество по уровню шума при движении колесного транспорта по струнному рельсу.

В качестве транспортного средства на легкой линии предполагается использовать бирельсовые подвесные электромобили (юнимобили) полной массой до 2 тонн с ограничением вертикальной нагрузки на одно колесо до 2,5 кН. Данное решение обосновано преимуществом в уменьшении и более равномерном распределении транспортной нагрузки на легкие путевые структуры uST за счет использования автоматизированного поточного движения юнимобилей вместимостью до 8 пассажиров вместо многотонных вместимостью 40–60 пассажиров. При этом пассажиропоток для двух вариантов одинаков, но применение данного подхода с легкими автоматизированными электромобилями многократно уменьшает материалоемкость, увеличивает долговечность и надежность конструкций путевых структур uST.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе моделирования реализованы типичные этапы расчетной задачи ANSYS [5, 6], которые приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Этапы расчетной задачи анализа контактного взаимодействия пары "колесо–рельс"

№ этапов задачи	Наименование выполненных этапов задачи
1	Подготовка геометрической 2D модели с расчетными нагрузками
2	Создание 3D модели, подготовка конечно-элементной модели (КЭМ) в препроцессоре
3	Задание характеристик материалов контактной пары колесо–рельс, граничных условий, диапазона значений варьируемых параметров
4	Запуск расчетов
5	Анализ и описание результатов контактных взаимодействий

На Рис. 1 приведена схема общего вида контактной пары «колесо–рельс» с приложенными нагрузками (выполнена в ПО AutoCAD).

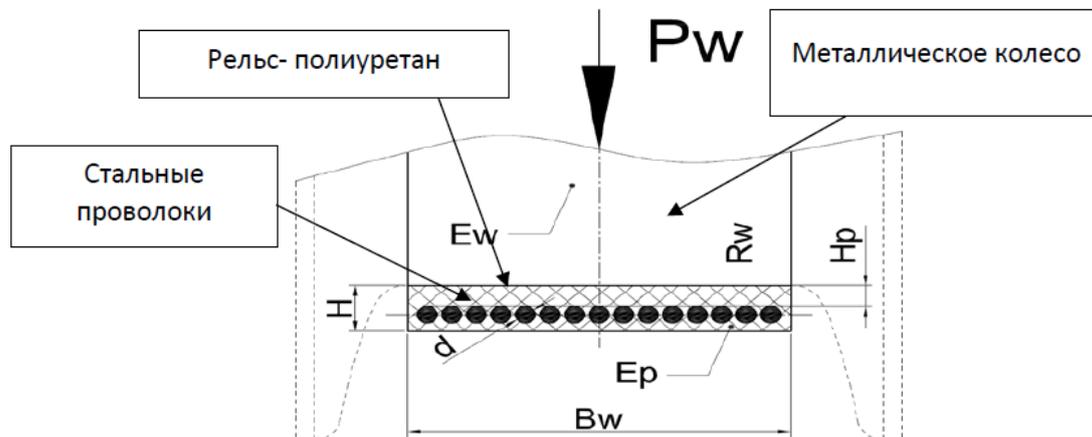


Рис. 1. Схема общего вида контактной пары «колесо–рельс» с прилагаемыми нагрузками: P_w – вертикальная нагрузка на колесо; E_w – модуль упругости материала колеса, E_p – модуль упругости материала головки рельса; B_w – ширина контакта колесо–рельс; R_w – радиус качения колеса; d – диаметр проволок; H_p – толщина полимерного слоя над проволоками; H – суммарная высота рельса $H=H_p+d+2$ (мм)

Указанные нагрузки, физические и геометрические параметры согласно схеме Рис. 1 P_w , E_w , E_p , B_w , R_w , d ; H_p ; H были приняты как варьируемые показатели. Варианты, используемые далее для расчетов и анализа, приведены в Табл. 2.

Таблица 2. Варьируемые параметры для расчетов и их значения

№ п/п	Изменяемые параметры	Обозначение параметра	Принятый шаг варьирования	Единица измерения
1	Ширина рельса/колеса	B_w	50, 60, 75, 90, 100	мм
2	Толщина полимерного слоя над проволоками	H_p	5, 8, 10	мм
3	Модуль упругости материала колеса	E_w	50, 200, 1000, 200000	МПа
4	Модуль упругости материала головки рельса	E_p	50, 200, 1000	МПа
5	Вертикальная нагрузка на колесо	P_w	50–2500 (шаг 245)	Н

После задания граничных условий выполнен статический расчет напряженно-деформированного состояния контактной зоны. На Рис. 2 приведено распределение контактных напряжений на общем виде пятна контакта «колесо–рельс», на Рис. 3 – распределение максимального размаха контактных напряжений σ_k в проволоках рельса.

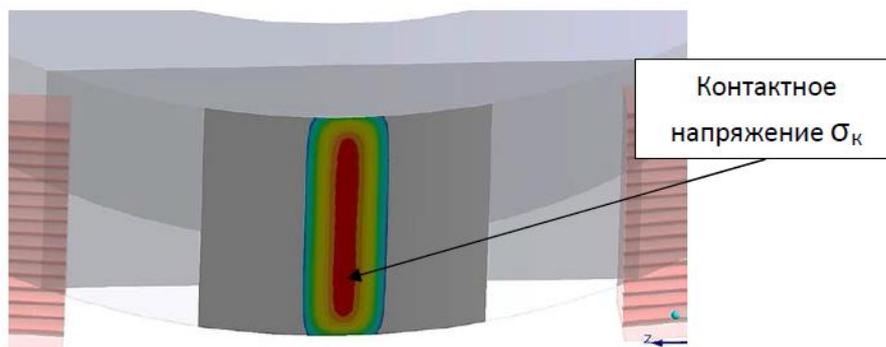


Рис. 2. Общий вид пятна распределения напряжений в зоне контакта «колесо–рельс»

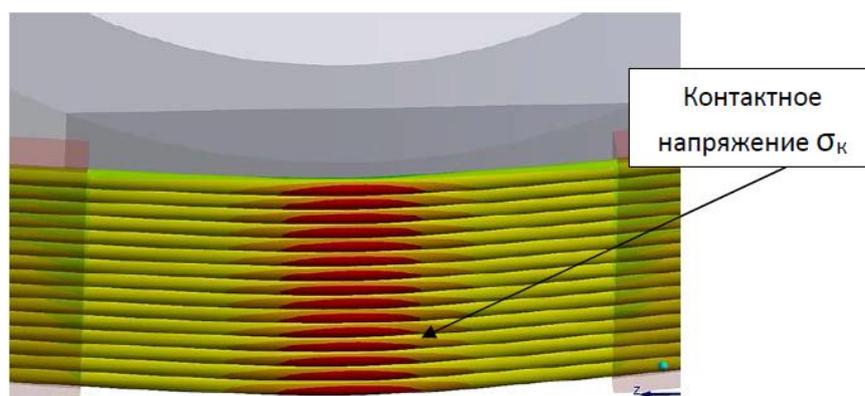


Рис. 3. Зона максимального размаха напряжений в стальных проволоках полиуретановой конструкции рельса

После расчетов по варьируемым параметрам, приведенным в Табл. 2, в качестве критериев оптимизации выбраны два следующих показателя:

1) максимальный уровень контактных напряжений σ_k в паре «цилиндрическое колесо–полимерная головка рельса» как показатель, напрямую влияющий на износостойкость рельса и сопротивление качению колеса;

2) максимальный размах напряжений в несущих стальных проволоках (струнах) при воздействии циклической вертикальной нагрузки от колес подвижного состава как показатель, определяющий долговечность и соответственно срок службы рельса.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Расчетная модель представляет собой параметрическую твердотельную конечно-элементную модель контактной пары «цилиндрическое колесо–полимерная головка рельса». В ее состав входит гибкий рельс с предварительно напряженными проволоками и сектор

колеса для передачи вертикального усилия от веса юнимобиля. Реализованная конечно-элементная модель представлена на Рис. 4.

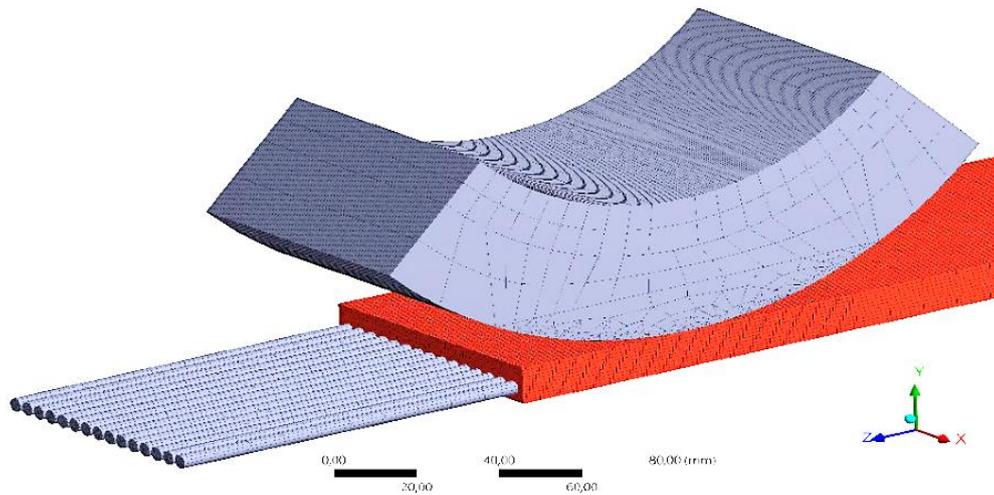


Рис. 4. Общий вид расчетной КЭМ

Порядок нагружения контактной пары принят в 2 этапа: на первом из них происходит натяжение гибкого рельса до уровня $0,5 \sigma_{0,2}$ (до 1000 МПа) материала проволок, на втором прикладывается вертикальная нагрузка P_w от колеса до 2500 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Влияние диаметра проволок на величину размаха напряжений.

Величина размаха напряжений в проволоках рельса при воздействии колес подвижного состава непосредственно определяет усталостную выносливость несущих элементов рельса и является определяющим критерием выбора конструктивных параметров. В гибких системах суммарный размах напряжений можно оценить по формуле 1:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_N + \Delta\sigma_M = \frac{\Delta N_{\max}}{A} + \frac{M_{\max}}{W}, \quad (1)$$

где

$\Delta\sigma_N$ – размах напряжений, возникающий в проволоках площадью поперечного сечения A вследствие «донатяжения» элементов при проезде юнимобиля на величину усилия ΔN_{\max} ;

$\Delta\sigma_M$ – размах напряжений, возникающий в проволоках с моментом сопротивления поперечного сечения проволок W вследствие действия локального изгибающего момента $M_{\text{изг}}$.

Эпюра изгибающего момента $M_{\text{изг}}$ приведена на Рис. 5.

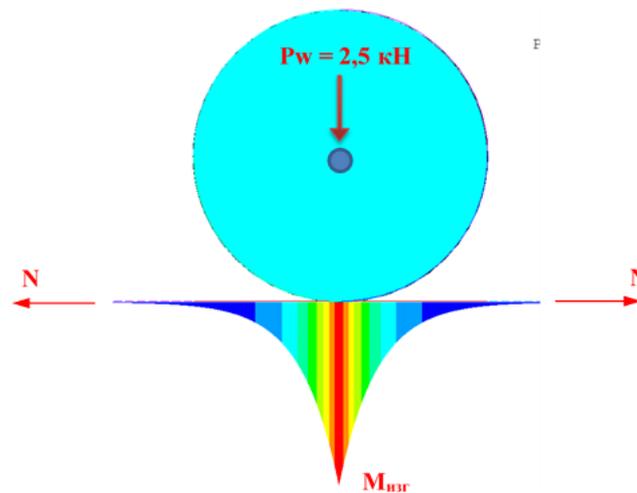


Рис. 5. Эпюра изгибающего момента, действующего на гибкий рельс в зоне контакта с колесом

Результаты расчетов и аналитическая зависимость, приведенная в формуле 2, указывают на то, что величина момента прямо пропорциональна вертикальной нагрузке, корню квадратному из жесткости рельса и обратна пропорциональна корню квадратному из величины натяжения рельса:

$$M_{\text{изг}} \sim \frac{P_w \sqrt{EI}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

где

P_w – вертикальная нагрузка на колесо, Н;

E – расчетный модуль упругости стали проволоки, Па;

I – момент инерции поперечного сечения гибкого рельса, приведенный к стали, соответствующий сопротивлению изгибу от действия вертикальных сил, м⁴;

N – усилие натяжения рельса, Н.

Ввиду низкого значения модуля упругости полимерной головки (до 1000 МПа) жесткость легкого рельса в основном определяется диаметром проволок и их количеством в ряду. В этой связи для выбора наиболее оптимального диаметра выполнена оценка размаха напряжений в несущих проволоках на пролете 100 метров при проезде юнимобилиа массой до 2 тонн.

В Табл. 3 приведено четыре варианта гибкого рельса с различными диаметрами преднапряженных проволок: 3, 4, 5 и 6 мм.

В Табл. 4 представлены результаты расчетов для каждого из 4-х предложенных вариантов Табл. 3.

Анализ результатов вычислений из Табл. 4 позволяет сделать вывод о том, что минимально допустимый диаметр проволок – 4 мм при условии

увеличения их количества до 20, что соответствует ширине рельса примерно в 100 мм, поскольку предел выносливости для стали $\Delta\sigma_c=160$ МПа [7].

Таблица 3. Конструктивные варианты гибкого рельса с различным диаметром преднапряженных проволок

Маркировка варианта, диаметр проволоки	Конструктивные варианты гибкого рельса с различным диаметром преднапряженных проволок
Вариант № 1 Ø3 мм	
Вариант № 2 Ø4 мм	
Вариант № 3 Ø5 мм	
Вариант № 4 Ø6 мм	

Таблица 4. Оценка размаха напряжений в проволоках рельса при движении бирельсового юнимобилia полной массой 2 тонны с нагрузкой на колесо 2,5 кН на пролете 100 метров для четырех диаметров проволоки (3, 4, 5 и 6 мм)

Характерные параметры оценки размаха напряжений	Номера конструктивных вариантов гибкого рельса с различным диаметром преднапряженных проволок			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Диаметр проволок, мм	3	4	5	6
Количество проволок в рельсе шириной 75 мм при однорядном расположении	20	15	12	10
Толщина рельса, мм	10	11	12	13
Суммарная площадь рельса, см ²	1,41	1,88	2,36	2,83
Расчетное натяжение рельса при предварительном напряжении проволок до $0,5\sigma_{02}$, кН	155,5	207,3	259,2	311,0
Погонная масса рельса, кг/м.п.	2,023	2,434	2,846	3,258
Прогиб от собственного веса на пролете 100 метров, м	0,159	0,144	0,135	0,128
Прогиб на пролете 100 метров от одиночного юнимобилia полной массой 2 тонны с учетом распределения нагрузки на два рельса, м	1,463	1,130	0,917	0,770

Характерные параметры оценки размаха напряжений	Номера конструктивных вариантов гибкого рельса с различным диаметром преднапряженных проволок			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Максимальное натяжение рельса при проезде юнимобилиа на пролете 100 метров, кН	167,5	216,9	267,1	317,7
Размах напряжений в проволоке от донатяжения при проезде юнимобилиа $\Delta\sigma_N$, МПа	85	51	34	24
Размах напряжений в проволоке от изгибающего момента под колесом $\Delta\sigma_M$, МПа	203	154	123	103
Суммарный размах напряжений $\Delta\sigma$, МПа	288	205	157	127

Влияние нагрузки на колесо на уровень контактных напряжений. На Рис. 6 приведена схема нагружения вертикальной нагрузки на колесо.

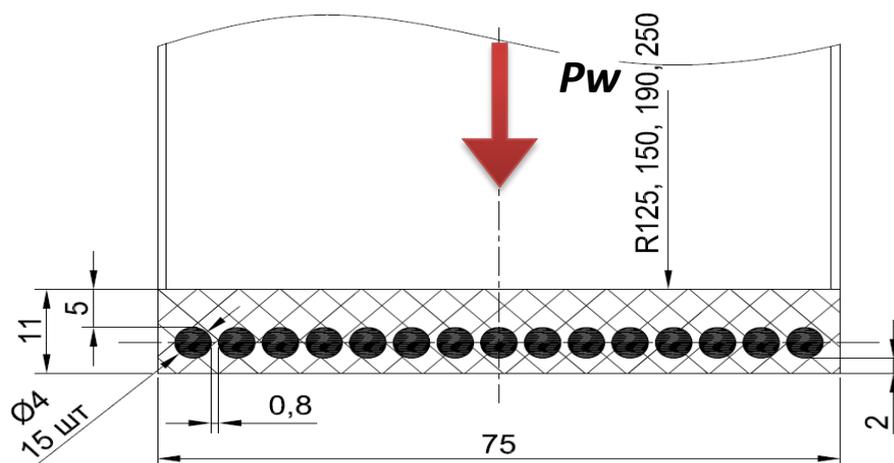


Рис. 6. Расчетный конструктивный вариант гибкого рельса

В Табл. 5 приведены результаты моделирования на контактное напряжение различных значений вертикальных нагрузок на колесо (соответствующий график представлен на Рис. 7).

Таблица 5. Результаты расчетов по исследованию влияния нагрузки от колеса на контактные напряжения

Нагрузка на колесо, P_w , Н	50	295	540	785	1030	1275	1520	1765	2010	2255	2500
Контактное напряжение, σ_k , МПа	0,28	0,79	1,17	1,47	1,74	1,99	2,23	2,47	2,68	2,90	3,11

Контактные
напряжения σ_k

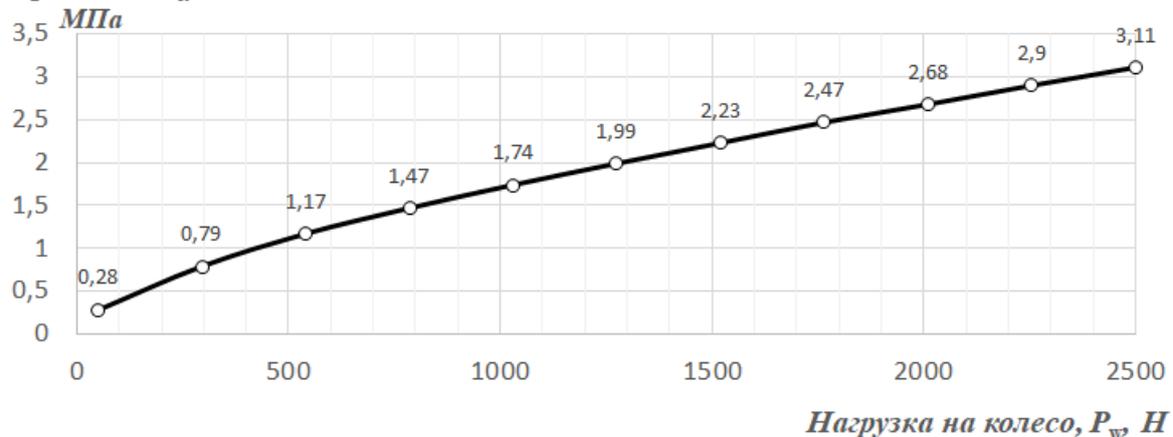


Рис. 7. Зависимость уровня контактных напряжений σ_k от нагрузки на колесо P_w

По результатам расчетов для стального колеса при модуле упругости $E_w = 200000$ МПа, полимерного рельса $E_p = 50$ МПа, приведенных в Табл. 5 и в графическом виде на Рис. 7, получена зависимость, выраженная формулой 3, которая показывает, что уровень контактных напряжений в паре пропорционален нагрузке на колесо в степени $2/3$:

$$\sigma_k \sim \sqrt[3]{P_w^2} \quad (3)$$

Влияние ширины контакта «колесо-рельс» на уровень контактных напряжений. Влияние ширины на контактное напряжение исследовано для следующих значений ширины: 50, 60, 75, 90 и 100 мм. Результаты моделирования приведены в Табл. 6, графическая зависимость B_w от σ_k – на Рис. 8.

Таблица 6. Уровень контактных напряжений σ_k в зависимости от ширины контакта B_w

Ширина контакта колесо-рельс B_w , мм	Конструктивный вариант	Пятно контакта	Контактное напряжение σ_k , МПа
50			4,12

Ширина контакта колесо-рельс B_w , мм	Конструктивный вариант	Пятно контакта	Контактное напряжение σ_k , МПа
60			3,61
75			3,11
90			2,76
100			2,51

В результате расчета уровень контактных напряжений при модуле упругости колеса $E_w=200000$ МПа и для полимерного рельса при модуле упругости $E_p=50$ МПа установлена зависимость σ_k от B_w в формуле 4, которая показывает, что σ_k обратно пропорционален ширине контакта B_w в степени $2/3$:

$$\sigma_k \sim \frac{1}{\sqrt[3]{B_w^2}} \quad (4)$$

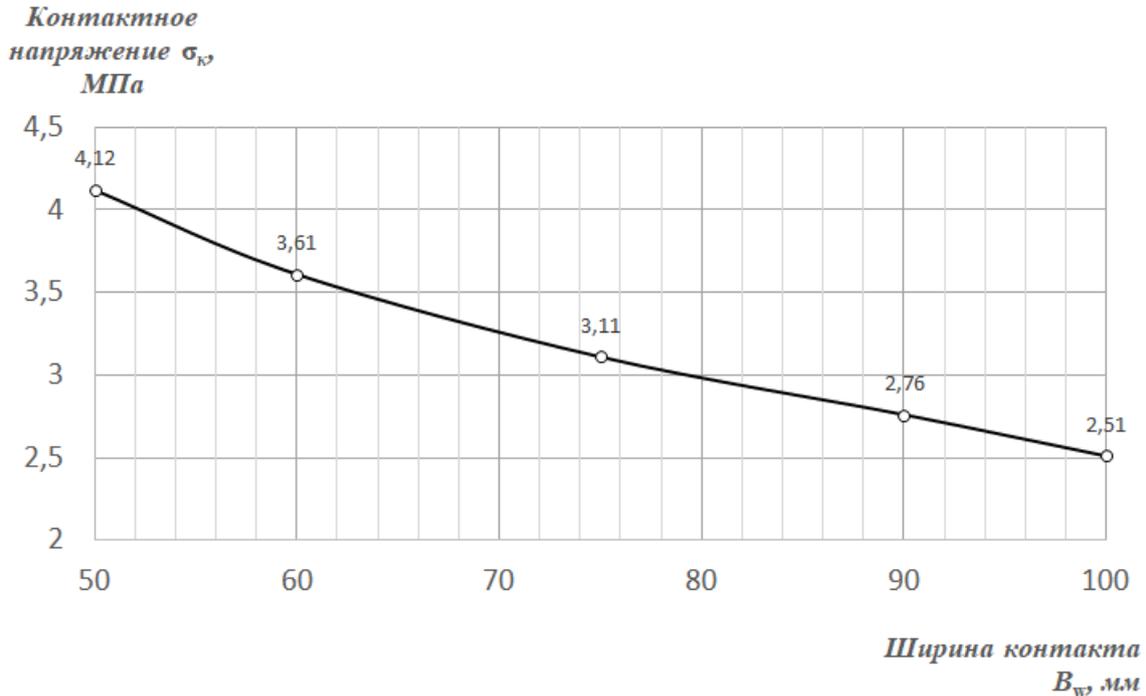


Рис. 8. Зависимость уровня контактных напряжений σ_k от ширины контакта B_w

Влияние радиуса колеса на уровень контактных напряжений. Следующий этап моделирования контактных напряжений, возникающих в зоне контакта колесной пары, проведен при четырех вариациях размеров колес. Расчетный вариант приведен на Рис. 9 (диаметр стальных проволок в сечении рельса принят 4 мм), результаты моделирования – в Табл. 7.

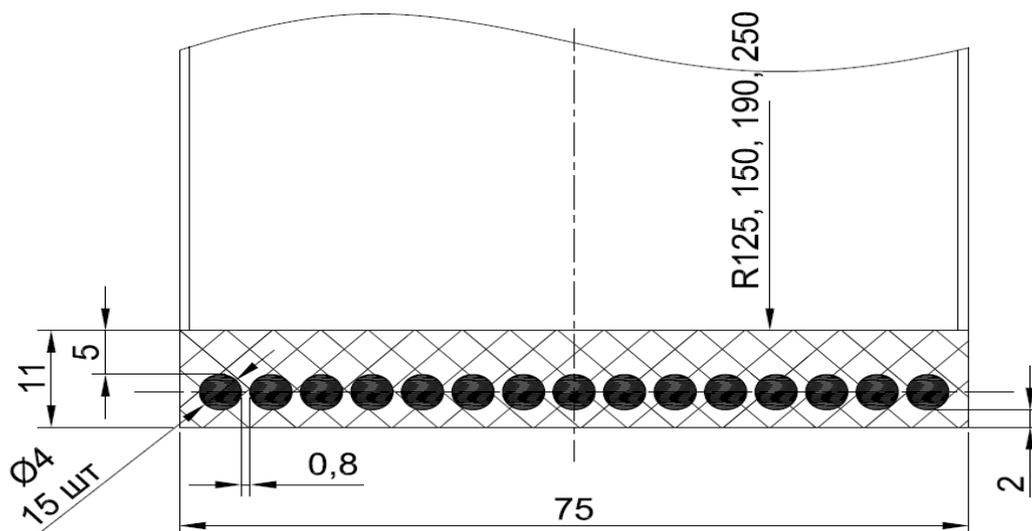
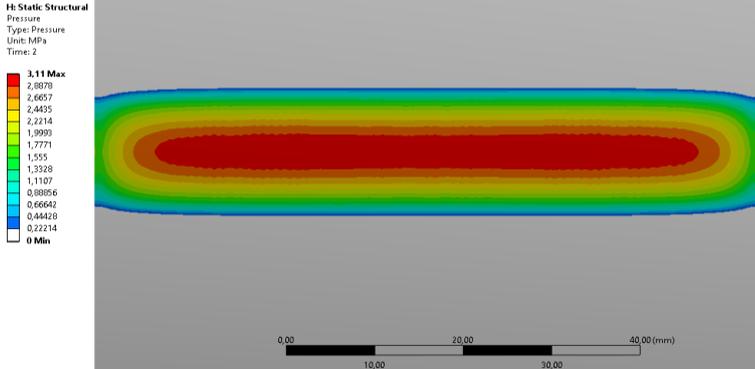
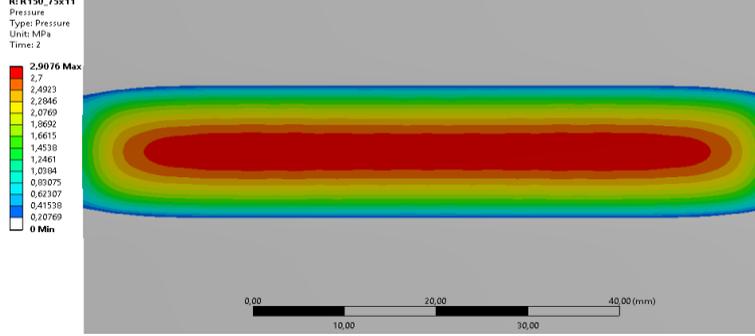
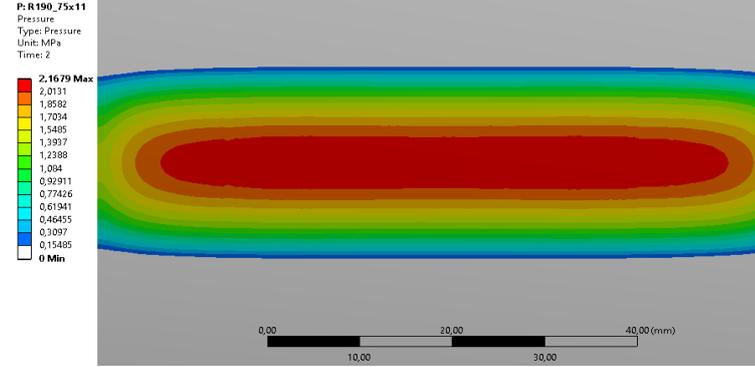
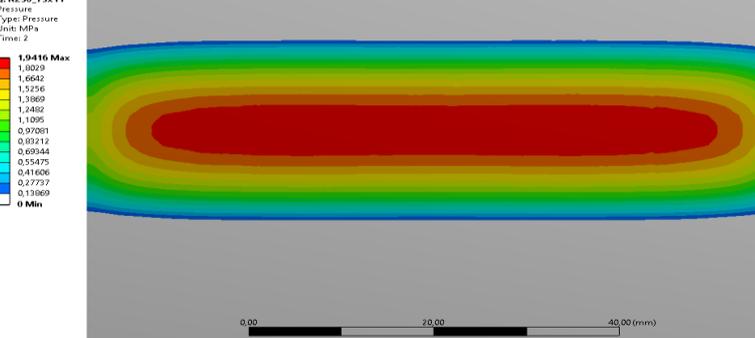


Рис. 9. Расчетный конструктивный вариант гибкого рельса

Таблица 7. Уровень контактных напряжений в зависимости от радиуса колеса R_w

Радиус колеса R_w , мм	Пятно контакта	Контактное напряжение σ_k , МПа
125		3,11
150		2,91
190		2,17
250		1,94

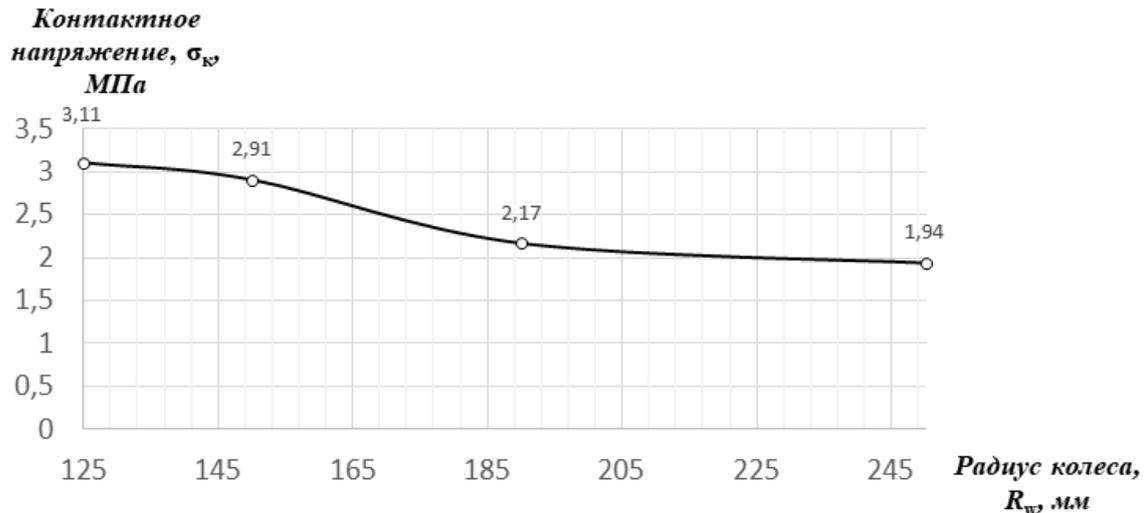


Рис. 10. Зависимость уровня контактных напряжений σ_k от радиуса колеса R_w

По результатам расчета уровень контактных напряжений стального колеса с модулем упругости $E_w = 200000$ МПа и полимерного рельса с модулем $E_p = 50$ МПа, установлена зависимость, представленная в формуле 5, обратно пропорциональна радиусу колеса R_w в степени $1/3$:

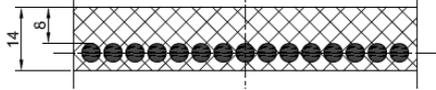
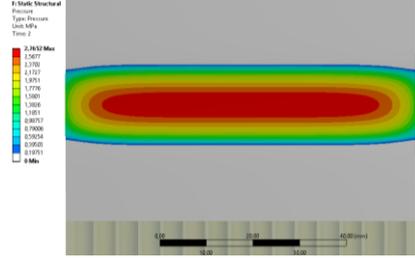
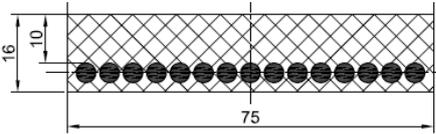
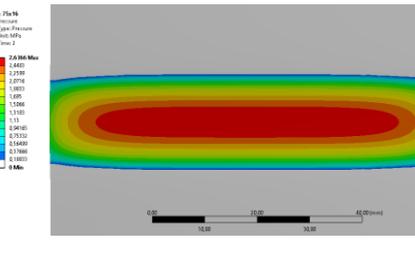
$$\sigma_k \sim \frac{1}{\sqrt[3]{R_w}} \quad (5)$$

Влияние толщины полимерного слоя на уровень контактных напряжений

Моделирование пятна напряжений в зоне контакта «колесо–рельс» в зависимости от различной толщины полимерного слоя H_p над стальными проволоками представлено в Табл. 8.

Таблица 8. Результаты моделирования контактных напряжений в зависимости от толщины полимерного слоя над проволоками H_p

Конструктивный вариант, толщина полимерного слоя над проволоками H_p , мм	Пятно контакта	Контактное напряжение σ_k , МПа
<p>$H_p = 5$ мм</p>		3,11

Конструктивный вариант, толщина полимерного слоя над проволами H_p , мм	Пятно контакта	Контактное напряжение σ_k , МПа
<p style="text-align: center;">$H_p = 8$ мм</p> 		2,77
<p style="text-align: center;">$H_p = 10$ мм</p> 		2,63

Анализ данных Табл. 8 позволяет сделать вывод, что:

- изменение толщины полимерного слоя незначительно влияет на уровень контактных напряжений в контактной паре стальное колесо ($E_w = 200000$ МПа) и полимерный рельс ($E_p = 50$ МПа);
- при увеличении толщины H_p в 2 раза с 5 до 10 мм контактные напряжения снижаются на 18 %.

Влияние упругих свойств материалов колеса и рельса на уровень контактных напряжений, величину пятна контакта, условный показатель. На данном этапе варьирование двух показателей – модулей упругости полимерного рельса и материала колеса (для колеса были приняты варианты как для полиуретана, так и для стали) – позволило установить изменчивость контактных напряжений, площадь контакта. Также для оценки результатов расчета был введен условный показатель. Соответствующие численные значения представлены в таблицах 9–11.

Вертикальная нагрузка на колесо принята постоянной и равной 2500 Н.

Таблица 9. Влияние упругих характеристик материалов контактной пары «колесо–рельс» на максимальный уровень контактных напряжений

Модуль упругости материала рельса (полиуретан), E_p , МПа	Уровень контактных напряжений σ_k , МПа			
	Модуль упругости материала колеса E_w , МПа			
	полиуретан			сталь
	50	200	1000	200000
50	2,7	3,3	3,7	3,8
200	2,9	4,4	5,4	5,9
1000	2,9	4,9	8,2	10,6

Таблица 10. Влияние упругих характеристик материалов контактной пары «колесо–рельс» на площадь пятна контакта

Модуль упругости материала рельса (полиуретан), E_p , МПа	Площадь пятна контакта A_k , мм ²			
	Модуль упругости материала колеса E_w , МПа			
	полиуретан			сталь
	50	200	1000	200000
50	1498	1202	1077	1063
200	1366	874	719	657
1000	1321	777	452	370

Таблица 11. Зависимости условного показателя оптимальности контактируемых материалов* от модулей упругости материала рельса E_p и колеса E_w

Модуль упругости материала рельса (полиуретан), E_p , МПа	Условный показатель* $\sigma_k \cdot A_k$, МПа·мм ²			
	Модуль упругости материала колеса, E_w , МПа			
	полиуретан			сталь
	50	200	1000	200000
50	4045	3967	3985	4039
200	3961	3846	3883	3876
1000	3831	3807	3706	3922

* Примечание: за условный показатель оптимальности контактируемых материалов и площади пятна контакта принято произведение уровня контактных напряжений и площади пятна контакта. Чем ниже значения данного показателя, тем ниже удельное сопротивление качению колеса по рельсу и, соответственно, энергозатраты на движение транспорта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования в пакете конечно-элементного анализа ANSYS Workbench получены численные результаты, анализ которых позволяет сделать следующие выводы и установить зависимости:

1) долговечность несущих элементов легкого рельса – высокопрочных проволок с полиуретановым покрытием – главным образом определяется величиной изгибающего момента под колесом подвижного состава, которая прямо пропорциональна вертикальной нагрузке, корню квадратному из изгибной жесткости рельса и обратна пропорциональна корню квадратному из величины натяжения рельса (2);

2) для обеспечения требуемой надежности данных элементов рекомендуется ограничить нагрузку на колесо до 2500 Н, а суммарную площадь проволок одного рельса при однорядном расположении – не менее 2,3 см². Этому соответствуют конструкции рельса для движения бирельсового юнимобилиа полной массой до 2 тонн, одна ветвь которого включает 20 проволок диаметром 4 мм при ширине рельса 100 мм, либо 12 проволок диаметром 5 мм при ширине рельса 75 мм (эти два варианта приведены на Рис. 11). В данном случае номинальное натяжение легкой бирельсовой путевой структуры, состоящей из двух струнных рельсов, составит около 52 тонн;

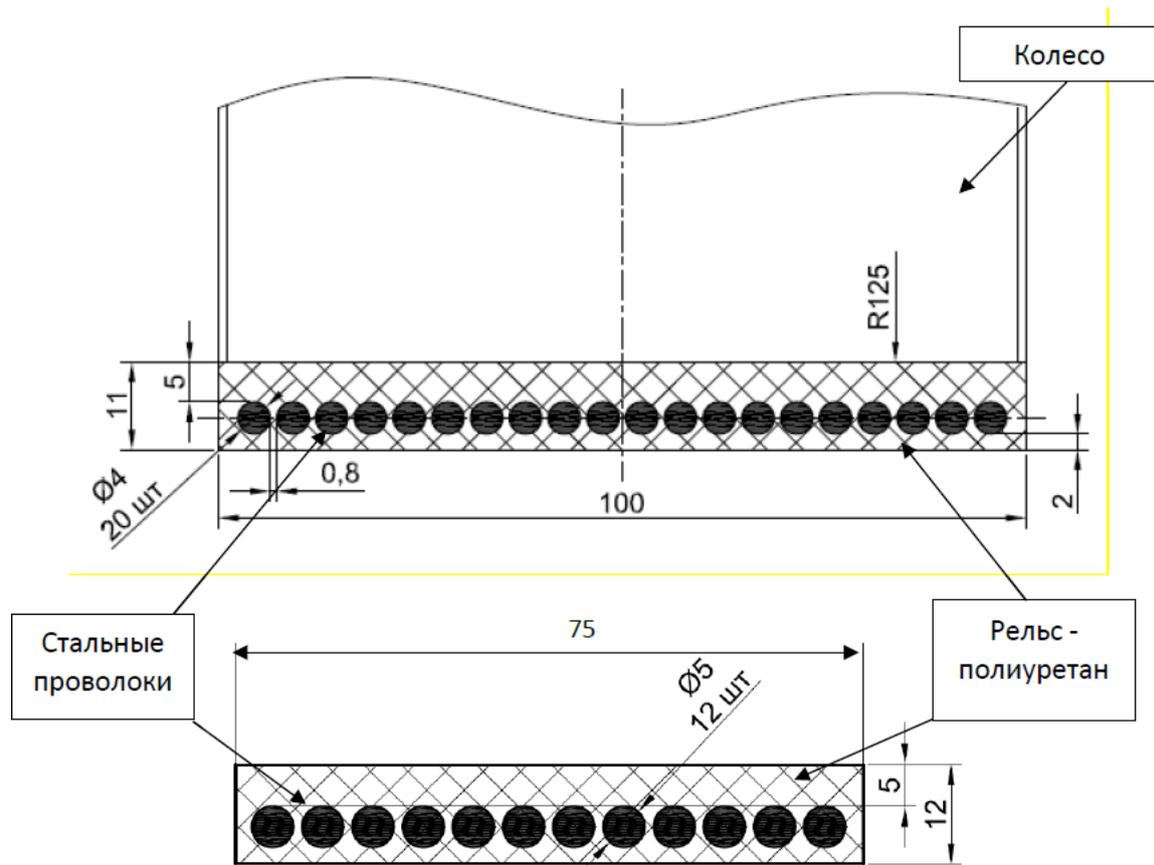


Рис. 11. Оптимальные конструкции ветви легкого струнного рельса (с точки зрения долговечности несущих элементов рельса) для движения бирельсового юнимобиля полной массой до 2 тонн

3) максимальный уровень контактных напряжений в паре «колесо–рельс» определяет стойкость полимерной головки к износу. Допустимая величина контактных напряжений достоверно не известна, зависит от многих параметров и во многом будет определяться на основе экспериментов и статистических данных. По результатам расчетов, зависимости контактных давлений σ_k от ширины контакта B_w , радиуса колеса R_w и нагрузки на колесо P_w сводятся к следующей зависимости в (6)

$$\sigma_k = \sqrt[3]{\frac{P_w^2}{R_w \cdot B_w^2}} \quad (6)$$

Таким образом, для уменьшения уровня контактных давлений целесообразнее уменьшить нагрузку на колесо либо увеличить ширину контакта, чем увеличивать радиус колеса;

4) на основе результатов расчета пятен контакта для различных сочетаний материалов колеса и рельса рассчитаны уровни контактных давлений и предложен показатель, характеризующий удельное сопротивление качению колеса по рельсу. С этой точки зрения, наиболее оптимальной является контактная пара, где модуль упругости полимерной

головки рельса равен модулю упругости материала колеса $E_p = E_w$, т. е. в контактной паре используются подобные по упругости материалы.

Библиографический список / References

1. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе. – Силакросг: ПНБ принт, 2019. – 576 с. [Yunitskii AE. *Strunnnye transportnye sistemy: na Zemle i v Kosmose*. Silakrogs: PNB print; 2019. 576 p. (In Russ.)]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 26.09.2022 Доступно по: <https://www.rulit.me/books/strunnnye-transportnye-sistemy-na-zemle-i-v-kosmose-read-488548-1.html>
2. Структура комплекса [Электронный ресурс]. [*Struktura kompleksa* [Internet]. (In Russ.)]. Доступно по: <https://ust.inc/technology/structure-complex?lang=ru> Ссылка активна на: 17.10.2022.
3. Попов А.Н. Моделирование конструктивно-нелинейных контактных задач в программном комплексе ANSYS // Форум молодежной науки. – № 2. – 2021. [Popov AN. *Modelirovanie konstruktivno-nelinejnyh kontaktnyh zadach v programmnom komplekse ANSYS* [Internet]. Forum molodjozhnoj nauki. 2021;2. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 28.09.2022. Доступно по: <https://forumn.ru/article-2.2.1.pdf>
4. Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бокучава П.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений в среде ANSYS // Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова. – СПб. [Karatushin SI, Hramova DA, Bokuchava PN. *Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostojanija boltovyh soedinenij v srede ANSYS*. Baltic State Technical University VOENMEH by D.F. Ustinov. St. Petersburg. (In Russ.)] Ссылка активна на: 28.09.2022. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-boltovyh-soedineniy-v-srede-ansys/viewer>
5. Лукьянова А.Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS: лабор. работа. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 52 с. [Luk'janova AN. *Modelirovanie kontaktnoj zadachi s pomoshh'ju programmy ANSYS: labor. work*. Samara: Samara State Technical University; 2014. 52 p. (In Russ.)] Ссылка активна на: 28.09.2022. Доступно по: http://mmm.samsu.ru/polyakov/ansys/lab_samgtu/lab_09_samgtu.pdf
6. Котов А.Г. Основы моделирования в среде ANSYS. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. – 200 с. [Kotov AG. *Osnovy modelirovanija v srede ANSYS*. Perm': Perm State Technical University; 2008. 200 p. (In Russ.)].
7. ТКП EN 1993-1-11-2009 (02250) Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-11. Проектирование конструкций со стальными элементами, работающими на растяжение. – Введ. 2009-12-10. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 44 с. [ТССР EN 1993-1-11-2009 (02250) Eurocode 3. *Proektirovanie stal'nyh konstrukcij. Chast' 1-11. Proektirovanie konstrukcij so stal'nymi jelementami, rabotajushhimi na rastjazhenie*. Intro. 2009-12-10. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Republic of Belarus, 2009. 44 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:**Цырлин Михаил Иосифович**, кандидат технических наук;

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

E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

Юницкий Анатолий Эдуардович, председатель совета директоров, генеральный конструктор;

E-mail: a@unitsky.com

Хлебус Александр Степанович, начальник группы прочностного анализа;

E-mail: a.khlebus@unitsky.com

Иванова Елена Аллксандровна, ведущий научный сотрудник;

E-mail: e.ivanova@unitsky.com

Шашко Александр Евгеньевич, ведущий инженер;

E-mail: a.shashko@unitsky.com

Information about the authors:**Michael I. Tsyrlin**, Candidate of Technical Sciences;

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

E-mail: m.tsirlin@unitsky.com

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

E-mail: a@unitsky.com

Aliaksandr S. Khlebus, Strength Analysis Team Lead;

E-mail: a.khlebus@unitsky.com

Elena A. Ivanova, Leading Researcher;

E-mail: e.ivanova@unitsky.com

Aliaksandr E. Shashko, Lead Engineer;

E-mail: a.shashko@unitsky.com

Цитировать:

Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Иванова Е.А., и др. Моделирование контактной пары «колесо-рельс» экспериментальной конструкции гибкого рельса в легких линиях струнной транспортной системы uST // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 107–125. doi: 10.17816/transsyst202284107-125

To cite this article:

Unitsky AE, Khlebus AS, Ivanova EA, et al. Simulation of the contact pair “wheel-rail” of the experimental design of the flexible rail in the lightweight tracks of the uST string transport system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):107-125. doi: 10.17816/transsyst202284107-125

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.26

DOI 10.17816/transsyst202284126-139

© Л.М. Чеченова

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

ОБОСНОВАНИЕ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ КОНТЕЙНЕРНЫХ СЕРВИСОВ ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Обоснование: в части актуальных тенденций развития транспортной отрасли и технологических трендов можно выделить использование цифровых инструментов в целях оптимизации логистики мультимодальных грузоперевозок. Совершенствование логистических сервисов предполагает расширение линейки цифровых участников процесса перевозки, развитие экосистем мобильности, формирование системы цифровых транспортных коридоров и напрямую ведет к персонализации цифрового поведения потребителей.

Цель: оценка основных контейнерных сервисов и эффективности логистики мультимодальных перевозок грузов наряду с технологиями, внедряемыми в процесс грузоперевозки. Мы подтверждаем, что предложенные решения позволяют повысить эффективность деятельности транспортной организации посредством применения инструментов цифровой логистики.

Методы: методология исследования построена на анализе данных об объемах, сроках и структуре перевозимых грузов контейнерами через порты Северо-Запада, оценке проектов по контейнерной перевозке грузов и оценке эффектов от их внедрения на полигоне Октябрьской железной дороги - филиала ОАО «РЖД» с учетом цифровой координации процесса взаимодействия с морскими портами. Информационная база исследования опирается на отчеты и нормативно-правовую базу Октябрьской железной дороги - филиала ОАО «РЖД» и методики планирования и нормирования расходов при проведении путевых работ.

Результаты: дана оценка контейнерным сервисам Октябрьской железной дороги через порты Санкт-Петербурга, актуализированы ключевые функции Дорожной информационно-логистической системы в цифровой координации процесса взаимодействия с морскими портами, Обоснована необходимость расширения возможностей онлайн сервисов ОАО «РЖД».

Заключение: результаты исследования подтверждают, что принципиально новые подходы к организации мультимодальных перевозок грузов контейнерами и движение к персонализации логистических решений под определенные запросы клиентов в части внедрения инструментов цифровой логистики открывает широкие перспективы для формирования и развития внешних и внутренних онлайн сервисов и услуг, обеспечения прозрачности взаимоотношений с клиентами и партнёрами в рамках всего цикла оказания услуг по мультимодальной перевозке с последующим созданием глобальной информационной среды для всех участников перевозки.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, контейнерные сервисы, мультимодальность, цифровая логистика.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **L.M. Chechenova**

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

SUBSTANTIATION OF SOLUTIONS IN THE FIELD OF DIGITALIZATION OF CONTAINER SERVICES OF THE OKTYABRSKAYA RAILWAY

Background: in terms of current trends in the development of the transport industry and technological trends, it is possible to single out the use of digital tools in order to optimize the logistics of multimodal cargo transportation. The improvement of logistics services involves the expansion of the line of digital participants in the transportation process, the development of mobility ecosystems, the formation of a system of digital transport corridors and directly leads to the personalization of digital consumer behavior.

Aim: to evaluate the main container services and logistics efficiency of multimodal cargo transportation along with technologies implemented in the process of cargo transportation. We confirm that the proposed solutions make it possible to increase the efficiency of the transport organization through the use of digital logistics tools.

Methods: the methodology of the study is based on the analysis of data on the volumes, timing and structure of cargo transported by containers through the ports of the North-West, evaluation of projects for container transportation of goods and evaluation of the effects of their implementation at the site of the Oktyabrskaya Railway - a branch of JSC «Russian Railways», taking into account digital coordination of the process of interaction with seaports. The information base of the study is based on reports and the regulatory framework of the Oktyabrskaya Railway - a branch of JSC «Russian Railways» and methods of planning and rationing expenses during track work.

Results: the evaluation of the container services of the Oktyabrskaya Railway through the ports of St. Petersburg is given, the key functions of the Road information and logistics system in the digital coordination of the interaction process with seaports are updated, the need to expand the capabilities of the online services of JSC «Russian Railways» is justified.

Conclusion: the results of the study confirm that fundamentally new approaches to the organization of multimodal cargo transportation by containers and the movement towards personalization of logistics solutions for certain customer requests in terms of the introduction of digital logistics tools opens up broad prospects for the formation and development of external and internal online services and services, ensuring transparency of relationships with customers and partners throughout the service cycle on multimodal transportation with the subsequent creation of a global information environment for all participants of transportation.

Key words: railway transport, container services, multimodality, digital logistics.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных трендов развития транспортной отрасли по-прежнему является использование цифровых инструментов для логистики грузоперевозок. Совершенствование логистических сервисов предполагает расширение линейки цифровых участников процесса перевозки, развитие экосистем мобильности, формирование системы цифровых транспортных коридоров и напрямую ведет к персонализации цифрового поведения потребителей, а именно, работе в режиме онлайн с набором дистанционно управляемых сервисов, безбумажному документообороту и минимизации личностных контактов. По оценочным данным экономический эффект от цифровой трансформации ОАО «РЖД» за период с 2019–2021 гг. достиг 8,2 млрд. руб., в частности, более 90 % грузоотправителей взаимодействуют с компанией через онлайн сервисы, более 11 млн. юридически значимых документов также оформляется в электронном виде. Сервис заказа услуг по перевозке грузов железнодорожным транспортом в цифровом виде, включая перевозку, подвижной состав, сопутствующие услуги включает:

- лоты подвижного состава – проведение электронных торгов за право заказа вагона под перевозку грузов;
- лоты грузов – проведение электронных торгов за право предложения вагонов под грузовую базу;
- предоставление вагонов субъектам МСП – совместный проект с АО «ФГК»;
- международные перевозки – организация перевозок грузов в экспортном, импортном, транзитном сообщениях;
- Ямал – организация перевозок грузов с участием Ямальской железнодорожной компании со 2-го полугодия 2022 г.;
- Калининград, о. Сахалин – организация перевозок грузов с участием железнодорожной паромной переправы, наработка технологий планирования различных видов транспорта.

Таким образом, реализация сервисов электронно-торговой площадки «Грузовые перевозки» ОАО «РЖД» существенно экономит время и сокращает эксплуатационные расходы за счет минимизации или исключения непроизводительных потерь с приростом в 24 % за 9 мес. 2022 г. к аналогичному периоду в 2021 г. по количеству вагоноотправок [1].

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глобальная перестройка существующих логистических цепочек поставок продолжает вносить изменения в планы участников

транспортного процесса по перевозке грузов контейнерами в части решения принципиально новых задач в сфере информационных технологий [2].

Объектом настоящего исследования является филиал ОАО «РЖД» – Октябрьская железная дорога (далее по тексту – ОЖД), основные характеристики которой представлены на Рис. 1.



Рис. 1. Основные характеристики полигона ОЖД

Источник: составлено автором по данным [3]

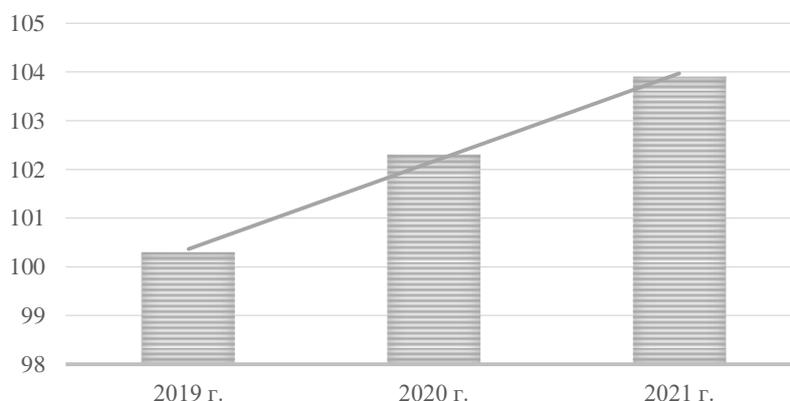


Рис. 2. Динамика погрузки грузов (млн. тонн)

Источник: составлено автором по данным [3]

На протяжении последних лет магистраль стабильно формирует положительный тренд по увеличению объемов грузовой работы (Рис. 2). Несмотря на ограничения, связанные с пандемическим кризисом, введением санкций в отношении России, которые привели к дестабилизации рынка и изменению экономических взаимосвязей, перевозочная деятельность в ОЖД продолжается.

Так, по итогам первого полугодия 2022 г. количество отправленных грузов достигло почти 105 млн. тонн, что составляет более 8,5 % работы всей сети. Основными драйверами в перевозках являются такие номенклатуры, как удобрения, железная руда, строительные, нефтеналивные и контейнерные грузы (Рис. 3).

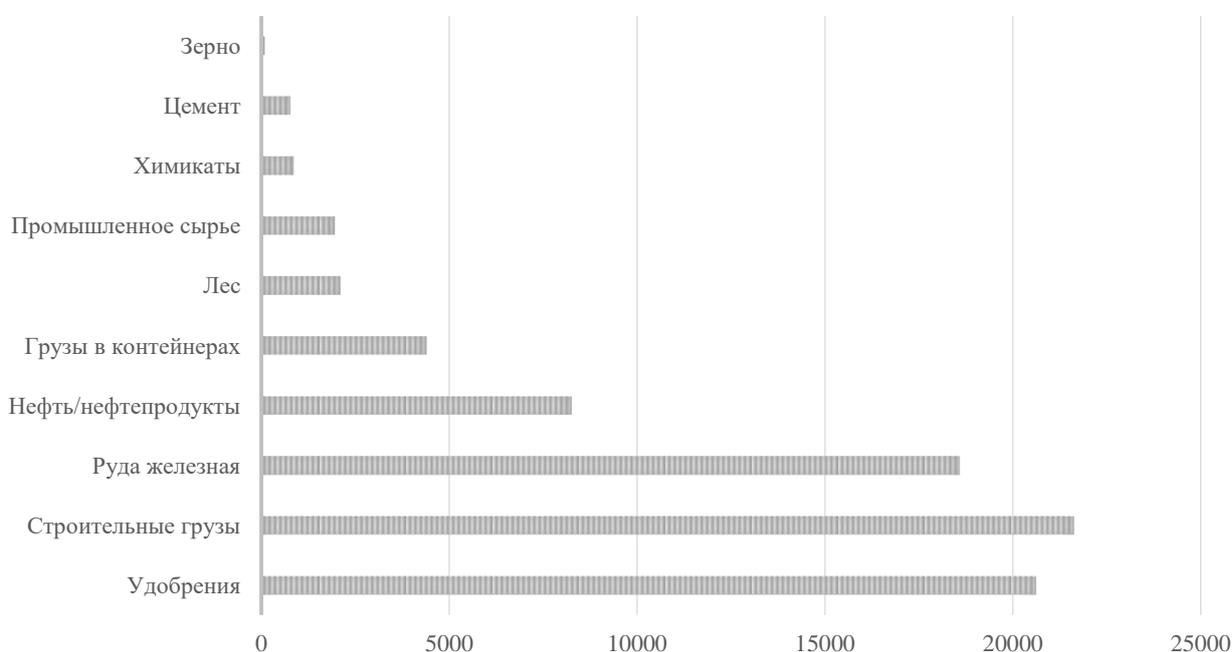


Рис. 3. Погрузка по основным номенклатурам за 10 месяцев 2022 г. (тыс. тонн)

Источник: составлено автором по данным [3]

Положительные результаты по итогам 10 месяцев текущего года в сравнении с аналогичным периодом 2021 г. достигнуты в основном благодаря слаженной работе с партнерами, в частности, при поддержке ООО «БалтТрансСервис», АО «Федеральная грузовая компания», ОАО «Торговый дом РЖД», ГК «Дело» и пр. (Рис. 4).

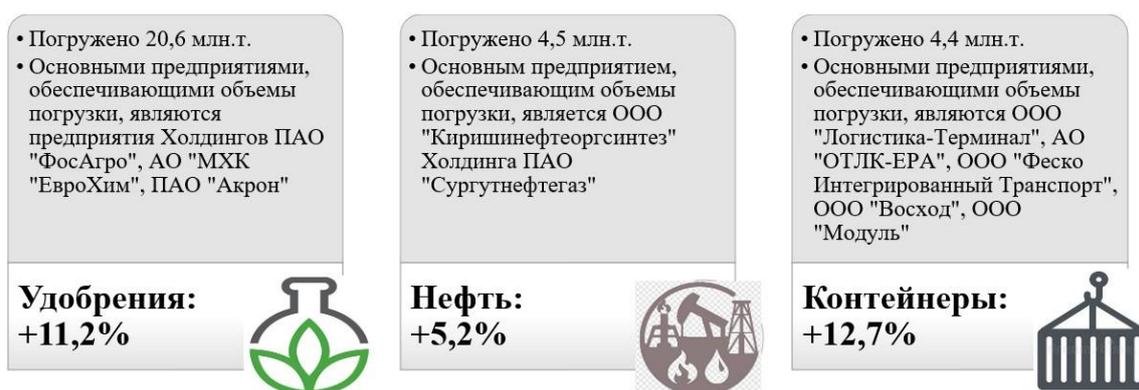


Рис. 4. Прирост погрузки по основным номенклатурам за 10 месяцев 2022 г. к аналогичному периоду за 2021 г.

Источник: составлено автором по данным [3]

Учитывая уникальное географическое положение полигона, ОЖД активно реализует проекты развития транспортных коридоров «Север-Юг» и «Запад-Восток» с созданием новых мультимодальных маршрутов. Особое место в этой работе занимают контейнерные перевозки с долей более 13 % грузоперевозок в сети ОАО «РЖД» (Рис. 5, 6).



Рис. 5. Структура контейнеропотока по номенклатуре грузов, %



Рис. 6. Структура контейнеропотока по направлениям перевозок, тыс. TEU

Источник: составлено автором по данным [3]

В целом объем транзитных контейнерных перевозок на полигоне ОЖД составил 67,1 тыс. TEU, что превышает показатели 2020 г. на 74 % (Рис. 7). Следует отметить рост транзитных перевозок в 2021 г. по сравнению с уровнем 2020 г. в направлении Китая в 2,5 раза в обратном направлении – в 5,1 раза (Рис. 8). В рамках деятельности ОЖД можно выделить основные преимущества, а именно: наличие 27 морских терминалов, 5 терминалов сухих портов, разработка и совершенствование проектов мультимодальных перевозок грузов.

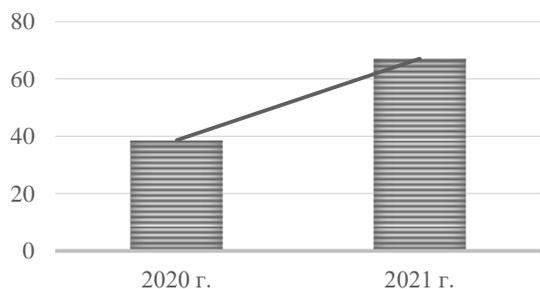


Рис. 7. Объем транзитных перевозок по полигону ОЖД, тыс. TEU

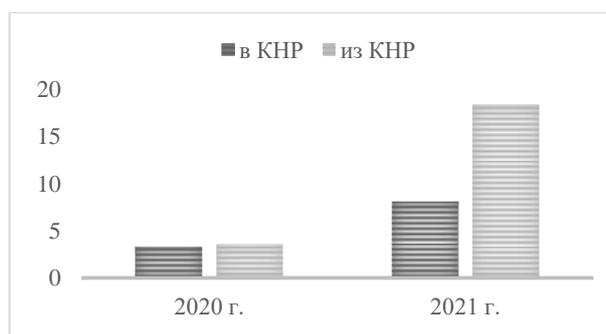


Рис. 8. Объем транзитных контейнерных перевозок в/из КНР, тыс. TEU

Источник: составлено автором по данным [3]

Длительность грузоперевозки из Азии в Россию – 7–9 дней по стоимости сопоставимой или ниже в сравнении с альтернативными видами транспорта, обеспечение 100 % сохранности груза. Целью данного исследования является обоснование решений в области цифровизации контейнерных сервисов ОЖД и разработка рекомендаций по повышению эффективности деятельности исследуемого полигона посредством применения цифровых технологий. Наша задача – оценить основные контейнерные сервисы и эффективность логистики перевозок через ОЖД в параллели с технологиями, внедряемыми в процесс грузоперевозки.

При оценке эффективности контейнерных сервисов ОЖД через порты Санкт-Петербурга использован метод сопоставления данных об объемах, сроках и структуре перевозимых грузов контейнерами через порты Северо-Запада. К основным инструментам ОАО «РЖД», используемым на полигоне Октябрьской железной дороги для новой логистики, можно отнести новые цифровые сервисы в личном кабинете клиента ОАО «РЖД» в сфере грузовых перевозок. Это также отражено в настоящем исследовании при актуализации ключевых функций Дорожной информационно-логистической системы (ДИЛС) в цифровой координации процесса взаимодействия с морскими портами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Дана оценка контейнерным сервисам ОЖД через порты Санкт-Петербурга. Ключевым вопросом в контексте проводимого исследования является оценка контейнерных сервисов (далее по тексту - КС), реализуемых ОЖД совместно с партнерами, предусматривающих рост грузооборота для железной дороги в рамках реализации проектов мультимодальной доставки грузов. Результаты анализа логистических

решений ОЖД наглядно свидетельствуют о переходе на новую модель функционирования транспортно-логистического блока с решением задач по организации КС в интеграции с национальными и зарубежными партнерами (Табл.)

Таблица. Преимущества контейнерных сервисов ОЖД

Логистика перевозки		Индикаторы КС – за 11 мес. 2022 г.		Снижение карбонового следа, тыс. тонн	
ЖД и морская перевозка	Альтернативный маршрут-морская перевозка	Объем перевозок (TEU)	Срок доставки (сутки)	ЖД-перевозка	Морская перевозка
1. КС через порты Санкт – Петербурга и Дальнего Востока					
Специфика КС – перевозка грузов из стран/ в страны АТР: Вьетнам, Гонконг, Индонезия, Камбоджа, Китай, Корея, Малайзия, Монголия, Сингапур, Тайланд, Тайвань, Япония, Филиппины, Шри-Ланка.					
Срок доставки: 14 сут. Расстояние: 11400 км	Срок доставки: 50 сут. Расстояние: 21000 км	из АТР: 26991 в АТР: 11903	12-14	203,9	881,7
2. КС ОАО «РЖД» «Чэнду (КНР) - Санкт – Петербург»					
Специфика КС – доставка груза для строительства Балтийского газохимического комплекса в порту Усть-Луга.					
Срок доставки: ч/з Монголию- 12 сут.; ч/з Казахстан- 10 сут. Расстояние: 7030-8480 км	Срок доставки: 50 сут. Расстояние: 22500 км	770	10-12	1,8	11,3
3. Контейнерные поезда через порт «Санкт – Петербург» со сквозным планированием					
Специфика КС – перевозка контейнерных грузов в Индию по маршруту из Тайюаня (Китай) через порт «Санкт-Петербург». Партнер – компания «Fesco». Особенность КС – согласование дат отправки и прибытия поезда с учетом судозаходов фидерной линии.					
Срок доставки: 11 сут. Расстояние: 8450 км	Срок доставки: 50 сут. Расстояние: 21000 км	1575	11	2,4	17,8
4. КС с использованием западного маршрута по ветке МТК «Север-Юг»					
Специфика КС – мультимодальная доставка грузов в Индию через Азербайджан и Иран. Партнер – АО «РЖД Логистика». Особенность КС – возможность использования маршрута как альтернативного в КНР и юго-восточную Азию.					
Срок доставки: 13 сут. Расстояние: 7200 км	Срок доставки: 35 сут. Расстояние: 14000 км	-	-	2,1	13,4

Логистика перевозки		Индикаторы КС – за 11 мес. 2022 г.		Снижение карбонового следа, тыс. тонн	
ЖД и морская перевозка	Альтернативный маршрут-морская перевозка	Объем перевозок (TEU)	Срок доставки (сутки)	ЖД-перевозка	Морская перевозка
5. КС с маршрутом через порт «Новороссийск» по ветке МТК «Север-Юг» Специфика КС – мультимодальная доставка грузов в Турцию, отправка продукции целлюлозно-бумажных комбинатов. Партнер – ПАО «ТрансКонтейнер».					
Срок доставки: 7 сут. Расстояние: 4300 км	Срок доставки: 18 сут. Расстояние: 8500 км	450	7	15,3	97,8
6. КС с использованием транскаспийского маршрута по ветке МТК «Север-Юг» Специфика КС – мультимодальная доставка грузов в Иран и Индию через порт Оля (Астрахань); отправка продукции целлюлозно-бумажных комбинатов в крытом подвижном составе. Особенность КС – возможность использования маршрута как альтернативного в КНР и юго-восточную Азию.					
Срок доставки: 14 сут. Расстояние: 7720 км	Срок доставки: 35 сут. Расстояние: 14000 км	2500	14	3,4	22,8

Источник: составлено автором

Таким образом, контейнерные перевозки на полигоне ОЖД активно реализуют сервисы по перевозке контейнеров, которые уже хорошо себя зарекомендовали на рынке транспортных услуг и пользуются спросом со стороны бизнеса (КС 1), а также сервисы, которые относятся к новым и расширяющим географию доставки грузов в контейнерах (КС 5–6).

Следует отметить также одно из ключевых направлений деятельности ОЖД – привлечение дополнительных объемов перевозок нефтеналивных грузов из Республики Беларусь в порты Северо-Запада. На полигоне ОЖД организована работа по сопровождению и диспетчеризации составов, следующих со станций «Барбаров» и «Новополоцк» со сроками доставки – 1 сут. и расстоянием от 805 до 1013 км.

2. Актуализированы ключевые функции Дорожной информационно-логистической системы (ДИЛС) в цифровой координации процесса взаимодействия с морскими портами.

Для обеспечения эффективной стыковки железнодорожного и морского видов транспорта при реализации транспортно-логистических проектов и организации мультимодальных перевозок грузов контейнерами на полигоне ОЖД функционирует Логистический центр (Рис. 9).

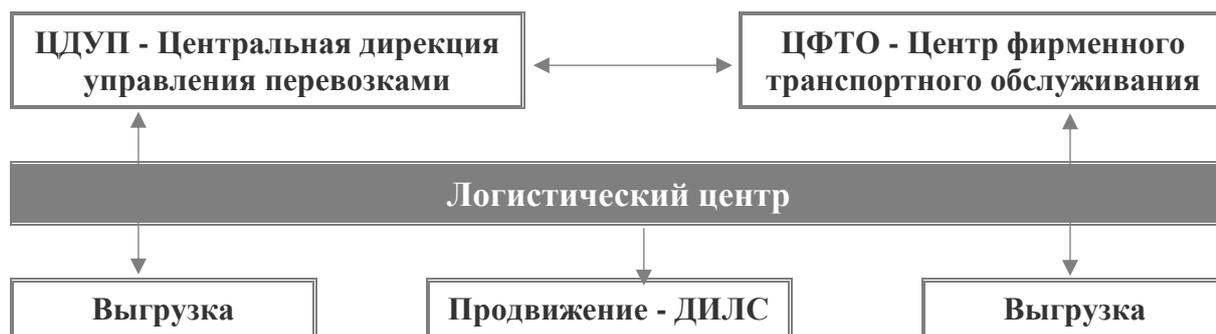


Рис. 9. Цифровизация процесса перевозки посредством ДИЛС

Источник: составлено автором

В рамках цифровой координации взаимодействия с морскими портами, экспедиторскими и операторскими компаниями, взаимодействия с железными дорогами при регулировке подвода поездов в порты Северо-Запада приоритетной задачей ОЖД является развитие ДИЛС (Рис. 10).

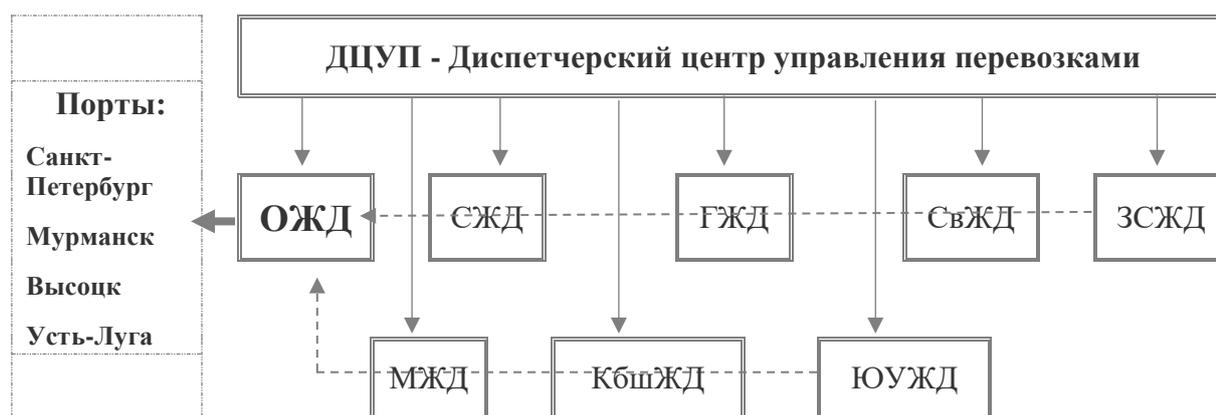


Рис. 10. Регулировка подвода поездов в порты Северо-Запада

Источник: составлено автором

В ходе исследования актуализированы ключевые функции ДИЛС, позволяющие эффективно реализовывать проекты мультимодальной доставки грузов на базе применения цифровых технологий по полигону ОЖД:

- планирование завоза экспортных грузов в адрес морских портов Северо-Западного региона;
- анализ продвижения экспортного грузопотока;
- анализ объемов выгрузки в морских портах;
- анализ работы пограничных переходов;
- планирование подвода поездов к припортовым станциям;
- анализ ритмичности отгрузки по сети железных дорог.

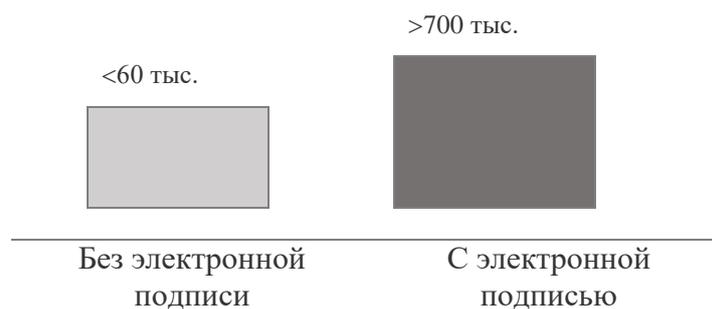


Рис. 11. Количество документов, оформленных в электронном виде

Источник: составлено автором по данным [4]

3. Обоснована необходимость расширения возможностей онлайн сервисов ОАО «РЖД». По данным ОАО «РЖД» за 11 мес. 2022 г. более 92 % документов оформлено клиентами дороги в электронном виде (Рис. 11). Активное развитие онлайн сервиса «Личный кабинет клиента ОАО «РЖД»» в сфере грузовых перевозок позволяет рассчитывать стоимость перевозки и дополнительных услуг, получать актуальную информацию о дислокации груза, техническом состоянии вагона и контейнера, текущих операциях с ними связанных. Кроме того, личный кабинет отображает данные о состоянии единого лицевого счета, возможности подписания отчетных документов оказанных услуг и подачи онлайн обращений в единый информационный справочный центр. Аналогом личного кабинета клиента является мобильное приложение «РЖД-Груз 2.0», доступное с любого гаджета.

Соответственно, расширение возможностей онлайн сервисов в направлении мультимодальной перевозки, обеспечит не только доступ с любого устройства, загрузку данных в автоматическом режиме из справочника пользователя услуг по перевозке, отслеживание информации и грузе, но и значительно расширит возможности операторов и грузоперевозчиков в части персонализации логистических решений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты настоящего исследования имеют отношение к конкретным проектам мультимодальной доставки грузов ОАО «РЖД» и оптимизации процесса их перевозки контейнерами. Представленные результаты оценки контейнерных сервисов через порты Санкт-Петербурга показали высокую эффективность новой модели функционирования транспортно-логистического блока ОЖД и возможные перспективы цифрового развития логистики перевозок.

Дискуссии по вопросам эффективного применения цифровых технологий на железнодорожном транспорте представлены в ряде исследований. В частности, исследование [5] обосновывает необходимость развития транспортной организации на базе применения инновационных технологий, что лежит в основе оказания качественной услуги по перевозке.

При оценке существующих цифровых сервисов ОАО «РЖД» мы опирались на концепцию [6], реализация которой предполагает создание единой цифровой платформы операторов-перевозчиков. Это, несомненно, является еще одним шагом на пути к мобильности цепей поставок, совершенствованию онлайн сервисов доставки грузов и технологий безбумажного документооборота, что полностью соответствует логике настоящего исследования.

В продолжение данного вопроса следует отметить труды [7–9], где всесторонне исследуются факторы, влияющие на развитие цифровых технологий в деятельности железнодорожного транспорта. Так, предложенные автором подходы к экономической оценке внедрения платформ распределенного реестра данных при мультимодальных перевозках дают возможность соотносить изменения в технологии работы контейнерных сервисов с потребностями рынка транспортных услуг региона.

Несомненно, заявленная в работе тематика вызывает интерес у научного и бизнес-сообществ, поскольку повышение мобильности контейнерных грузоперевозок является гарантией конкурентоспособной и продуктивной деятельности транспортных компаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтверждает, что принципиально новые подходы к организации мультимодальных перевозок грузов контейнерами и движение к персонализации логистических решений под определенные запросы клиентов в части внедрения инструментов цифровой логистики открывает широкие перспективы для формирования и развития внешних и внутренних онлайн сервисов и услуг, обеспечения прозрачности взаимоотношений с клиентами и партнёрами в рамках всего цикла оказания услуг по мультимодальной перевозке с последующим созданием глобальной информационной среды для всех участников перевозки.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Информационный портал «Транспортная неделя 2022». [Informacionnyj portal "Transportnaya nedelya 2022"]. [Internet]. (In Russ.). Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://t.me/s/transweek2022>
2. Журавлева Н.А. Влияние постпандемийной экономики на бизнес-модель транспортных организаций // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 3–4 (88–89). – С. 20–23. [Zhuravleva NA. Vliyanie postpandemijnoj ekonomiki na biznes-model' transportnyh organizacij. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2020;3-4:20-23. (In Russ.)]. Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <http://rotransport.com/transportrf/archiv/text.php?ID=&pdf=40270>
3. Официальный портал Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». [Oficial'nyj portal Oktyabr'skoj zheleznoj dorogi – filiala ОАО "RZhD"]. [Internet]. (In Russ.). Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://ozd.rzd.ru/ru/4012>
4. Официальный портал ОАО «РЖД»: онлайн сервисы перевозки грузов. [Oficial'nyj portal ОАО "RZhD": onlajn servisy perevozki грузов. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://cargo.rzd.ru/>
5. Казанская Л.Ф. Роль экономики качества в инновационном развитии транспортной организации // Экономика железных дорог. – 2017. – № 1. – С. 33–40. [Kazanskaya LF. Rol' ekonomiki kachestva v innovacionnom razvitii transportnoj organizacii. *Ekonomika zheleznyh dorog*. 2017;1:33-40. (In Russ.)]. Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28969585>
6. Волыхина Н.В. Концепция "mobility-as-a-service" в период цифровой трансформации транспортных систем // Сборник трудов: III Бетанкуровский международный инженерный форум. – 2021. – С. 89–92. [Volyhina NV. Konserciya "mobility-as-a-service" v period cifrovoj transformacii transportnyh sistem. *Sbornik trudov: III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum*. 2021:89-92. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47924936&pff=1> Ссылка активна на 07.12.2022.
7. Гулый И.М. Цифровые технологии искусственного интеллекта в деятельности российского железнодорожного транспорта // Транспортное дело России. – 2021. – № 1. – С. 121–123. [Gulyj IM. Digital technologies of artificial intelligence in the activities of russian railway transport. *Transport business of Russia*. 2021;1:121-123. (In Russ.)]. Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45572966&ysclid=lbwe959bb3983533529>
8. Gulyj IM. Economic assessment of the implementation of distributed data registry platforms in multimodal transport. E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives, SES 2020. 2020;01068. doi: 10.1051/e3sconf/202022001068
9. Гулый И.М., Митенев В.В. Теоретико-методологические основы кластерных систем // Экономические и социальные перемены в регионе: факты, тенденции, прогноз. – 2007. – № 1(36). – С. 19–25. [Gulyj IM, Mitenev VV. Theoretical and methodological basis of cluster systems. *Ekonomicheskie i social'nye peremeny v regione: fakty, tendencii, prognoz*. 2007;1:19-25. (In Russ.)]. Ссылка активна на 07.12.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17347277>

Сведения об авторе:

Чеченова Лиана Мухамедовна, кандидат экономических наук;
eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454;
E-mail: liana1981-149@mail.ru

Information about the author:

Liana M. Chechenova, PhD in Economics;
eLibrary SPIN: 7593-2214; ORCID: 0000-0002-2641-9454;
E-mail: liana1981-149@mail.ru

Цитировать:

Чеченова Л.М. Обоснование решений в области цифровизации контейнерных сервисов Октябрьской железной дороги // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 126–139. doi: 10.17816/transsyst202284126-139

To cite this article:

Chechenova LM. Substantiation of solutions in the field of digitalization of container services of the Oktyabrskaya railway. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):126-139. doi: 10.17816/transsyst202284126-139

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 338.47

DOI 10.17816/transsyst202284140-153

© Ю.В. Егоров

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВАГОННУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ГРУЗОВОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТАРИФА (НА ПРИМЕРЕ ПОЛУВАГОНОВ)

Обоснование: понимание показателей, влияющих на вагонную компоненту грузового железнодорожного тарифа, важно для разработки и реализации грамотной тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте, особенно в условиях санкционных ограничений, реализуемых третьими странами.

Цель: выделение и классификация показателей подвижного состава, влияющих на величину вагонной составляющей грузового железнодорожного тарифа, с последующей количественной оценкой такого влияния.

Методы: статистический метод, эконометрическое моделирование, анализ, сравнительный метод, системный метод.

Результаты: выделены показатели подвижного состава, влияющие на величину вагонной составляющей грузового железнодорожного тарифа, разработана классификация данных показателей по критерию применимости денежного измерителя, произведена эконометрическая количественная оценка влияния выделенных показателей на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа, сделаны выводы по чувствительности последней к различным временным лагам рассматриваемых показателей.

Заключение: полученные результаты могут быть использованы для совершенствования тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте, а также для дальнейшего развития теоретических основ в данной сфере.

Ключевые слова: *Грузовой железнодорожный тариф, вагонная составляющая, показатели подвижного состава, классификация, эконометрическая оценка, чувствительность.*

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© Yu.V. Egorov

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

THE INFLUENCE OF ROLLING STOCK INDICATORS ON THE CAR COMPONENT OF THE FREIGHT RAILWAY TARIF (BY THE EXAMPLE OF GONDEL CARS)

Background: understanding of the indicators affecting the car component of the freight railway tariff is important for the development and implementation of a competent tariff policy for freight railway transport, especially in the context of sanctions restrictions implemented by third countries.

Aim: identification and classification of rolling stock indicators that affect the value of the car component of the freight railway tariff, followed by a quantitative assessment of such an impact.

Methods: statistical method, econometric modeling, analysis, comparative method, system method.

Results: the indicators of the rolling stock that affect the value of the car component of the freight railway tariff are identified, a classification of these indicators is developed according to the criterion of applicability of the monetary meter, an econometric quantitative assessment of the influence of the identified indicators on the car component of the freight railway tariff is made, conclusions are drawn on the sensitivity of the latter to various time lags of the indicators under consideration.

Conclusion: the results obtained can be used to improve the tariff policy for freight rail transport, as well as to further develop the theoretical foundations in this area.

Key words: Freight railway tariff, car component, rolling stock indicators, classification, econometric assessment, sensitivity.

ВВЕДЕНИЕ

Ставка оперирования (или вагонная составляющая, ставка предоставления вагона под погрузку) на железнодорожном транспорте выделяется как одна из компонент грузового железнодорожного тарифа. В России данная компонента – это результат взаимодействия спроса и предложения на рынке операторских услуг. Понимание различных показателей, влияющих на данную составляющую грузового железнодорожного тарифа, важно для разработки и реализации грамотной тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте, особенно в условиях санкционных ограничений, реализуемых третьими странами. При этом среди этих показателей можно особо выделить показатели подвижного состава (вагонов), в котором осуществляется грузовая железнодорожная перевозка.

Среди авторов, исследующих вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа, можно выделить Хусаинова Ф.И. [1], Гайнутдинова Т.Р. и Голикова С.Д. [2], Ожерельеву М.В. [3], Годованого К.А. и Колесникова М.В. [4], Елового И.А. и Осипенко Л.В. [5], Винстона К. [6], Касаванта К. и др. [7], А. Уиджеера и др. [8]. Косвенно эта проблематика была затронута Волковой Е.М. [9], Чеченовой Л.М. [10], Журавлевой Н.А. [11], Гулым И.М. [12]. Признавая высокий уровень проведенных авторами исследований, отметим, что показатели, влияющие на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа, исследуются авторами недостаточно детально. Кроме того, лишь некоторые авторы (Хусаинов Ф.И. [1]) обращаются именно к показателям

подвижного состава, в котором осуществляется грузовая железнодорожная перевозка. Комплексная количественная оценка влияния таких показателей на вагонную компоненту также остается за пределами внимания исследователей.

В силу вышесказанного данное исследование является актуальным со следующей целью: выделить и классифицировать показатели подвижного состава, влияющие на величину вагонной составляющей грузового железнодорожного тарифа, и произвести количественную оценку этого влияния.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы, примененные в данном исследовании, описаны в Табл. 1.

Таблица 1. Материалы, примененные для количественной оценки влияния показателей подвижного состава на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа на примере полувагонов в РФ, данные за месяц [13]

Показатель	Переменная показателя в эконометрической модели (для Табл. 2, 10)	Охватываемый временной интервал
Средняя ставка аренды на полувагоны, руб. за вагон в сутки	$ARENDA_{PV_t}$	01.2018 г.–12.2021 г.
Отпускные цены на новые полувагоны (стандартные), млн. руб. за вагон	$CENA_{PV_{ST}_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Отпускные цены на новые полувагоны (инновационные), млн. руб. за вагон	$CENA_{PV_{INN}_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Средняя цена на новый вагон-комплект (сумма средних цен предложения на 4 боковые рамы, 4 колесные пары и 2 надрессорные балки), тыс. руб.	$CENA_{VAG_{KOMPL}_t}$	07.2019 г.–12.2021 г.
Общий парк полувагонов на сети РЖД, тыс. единиц	$OBSH_{PARK_{PV}_t}$	01.2018 г.–12.2021 г.
Рабочий парк полувагонов на сети РЖД, тыс. единиц	$RABOCH_{PARK_{PV}_t}$	01.2018 г.–12.2021 г.
Производство полувагонов в РФ, единиц	$PROIZV_{PV_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме ТР-1, тыс. руб./ваг	$CENA_{TR1_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме ТР-2, тыс. руб./ваг	$CENA_{TR2_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме ДР (с учетом стоимости запасных частей), тыс. руб./ваг	$CENA_{DR_{S_{ZP}_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.
Средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме КР (с учетом стоимости запасных частей), тыс. руб./ваг	$CENA_{KR_{S_{ZP}_t}$	01.2020 г.–12.2021 г.

Как следует из Табл. 1, в данном исследовании средняя ставка аренды на полувагоны использована в качестве показателя, описывающего

вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа в РФ (а не непосредственно ставка оперирования). Это допущение логично, т.к. полувагоны являются самым распространенным типом вагонов на сети РЖД и динамика ставки оперирования определяется динамикой средней ставки аренды вагона [13].

Средняя ставка аренды на полувагоны используется в данном исследовании в качестве эндогенной (результативной) переменной в построенных эконометрических моделях. Для экзогенных переменных данных моделей выделен ряд показателей подвижного состава, описанных в Табл. 1. При этом, по нашему мнению, эти показатели можно разделить на 2 группы: нестоимостные (общий парк полувагонов на сети РЖД, рабочий парк полувагонов на сети РЖД, производство полувагонов в РФ) и стоимостные показатели подвижного состава (все остальные показатели в Табл. 1).

Показатели, охарактеризованные в Табл. 1, применены для построения эконометрических моделей экономических процессов, которые описаны в Табл. 2.

Таблица 2. Эконометрические модели экономических процессов, примененные для количественной оценки влияния показателей подвижного состава на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа (на базе материалов Табл. 1)

№ модели	Математическая формула модели	Метод, использованный для оценки параметров модели
1	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * CENA_PV_ST_{t-1} + \varepsilon$	Обобщенный метод Кохрейна-Оркетта
2	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * CENA_PV_INN_{t-1} + b_2 * ARENDA_PV_{t-1} + \varepsilon$	
3	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * CENA_VAG_KOMPL_t + b_2 * CENA_VAG_KOMPL_{t-1} + b_3 * ARENDA_PV_{t-1} + b_4 * ARENDA_PV_{t-2} + \varepsilon$	
4	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * CENA_TR1_t + b_2 * CENA_TR2_t + b_3 * CENA_DR_S_ZP_t + b_4 * CENA_KR_S_ZP_t + b_5 * ARENDA_PV_{t-1} + \varepsilon$	
5	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * PROIZV_PV_{t-3} + b_2 * PROIZV_PV_{t-7} + b_3 * ARENDA_PV_{t-1} + \varepsilon$	
6	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * OBSH_PARK_PV_t + b_2 * OBSH_PARK_PV_{t-12} + b_3 * ARENDA_PV_{t-1} + \varepsilon$	
7	$ARENDA_PV_t = b_0 + b_1 * RABOCH_PARK_PV_t + b_2 * RABOCH_PARK_PV_{t-5} + b_3 * RABOCH_PARK_PV_{t-12} + b_4 * ARENDA_PV_{t-1} + \varepsilon$	

При построении моделей Табл. 2 использовались как сами переменные из Табл. 1 (к примеру, $ARENDA_{PV_t}$), так и их временные лаги с обозначением лагов в индексах переменных (к примеру, $ARENDA_{PV_{t-1}}$ – временной лаг первого порядка переменной $ARENDA_{PV_t}$). Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта в Табл. 2 – это модифицированный обобщенный метод наименьших квадратов (ОМНК), используемый при наличии автокорреляции остатков модели порядка более 1 [14, 15].

Статистическая значимость моделей Табл. 2 тестировалась с использованием критерия Фишера, статистическая значимость коэффициентов переменных этих моделей – с использованием критерия Стьюдента. Присутствие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии выявлялось с использованием теста ARCH. Наличие автокорреляции остатков моделей производилось путем исследования функций частной автокорреляции процессов остатков (PACF). Критерий согласия хи-квадрат использовался для проверки нормальности распределения остатков моделей.

Кроме того, в данном исследовании применялись статистический метод, анализ, сравнительный метод, системный метод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты оценки модели 1 Табл. 2 приведены в Табл. 3.

Таблица 3. Характеристики модели 1 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05.

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b1 переменной модели	762,6
Статистическая значимость коэффициента b1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,92
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Результаты оценки модели 2 Табл. 2 приведены в Табл. 4.

Таблица 4. Характеристики модели 2 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b1 переменной модели	269,8
Статистическая значимость коэффициента b1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,95
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Результаты оценки модели 3 Табл. 2 приведены в Табл. 5.

Таблица 5. Характеристики модели 3 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b1 переменной модели	-0,21
Статистическая значимость коэффициента b1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент незначим
Количественная оценка коэффициента b2 переменной модели	0,32
Статистическая значимость коэффициента b2 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,98
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Результаты оценки модели 4 Табл. 2 приведены в Табл. 6.

Таблица 6. Характеристики модели 4 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b_2 переменной модели	9,54
Статистическая значимость коэффициента b_2 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Количественная оценка коэффициента b_3 переменной модели	-1,76
Статистическая значимость коэффициента b_3 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,95
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Отметим, что классический метод наименьших квадратов для модели 4 (Табл. 6) дает аналогичные результаты, но с большей ошибкой модели. Коэффициенты b_1 и b_4 модели 4 статистически незначимы.

Результаты оценки модели 5 Табл. 2 приведены в Табл. 7.

Таблица 7. Характеристики модели 5 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05.

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b_1 переменной модели	0,06
Статистическая значимость коэффициента b_1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Количественная оценка коэффициента b_2 переменной модели	0,06
Статистическая значимость коэффициента b_2 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,96
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Результаты оценки модели 6 Табл. 2 приведены в Табл. 8.

Таблица 8. Характеристики модели 6 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05.

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b1 переменной модели	-20,06
Статистическая значимость коэффициента b1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Количественная оценка коэффициента b2 переменной модели	19,20
Статистическая значимость коэффициента b2 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,99
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Результаты оценки модели 7 Табл. 2 приведены в Табл. 9.

Таблица 9. Характеристики модели 7 (Табл. 2), уровень статистической значимости 0,05.

Характеристика модели	Значение характеристики модели
Метод оценки	Обобщенный метод Кохрейна-Оркотта
Результат теста на статистическую значимость модели (по критерию Фишера)	Модель значима
Количественная оценка коэффициента b1 переменной модели	-3,09
Статистическая значимость коэффициента b1 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Количественная оценка коэффициента b2 переменной модели	3,92
Статистическая значимость коэффициента b2 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Количественная оценка коэффициента b3	8,68

Характеристика модели	Значение характеристики модели
переменной модели	
Статистическая значимость коэффициента b_3 переменной модели (по критерию Стьюдента)	Коэффициент значим
Скорректированный коэффициент детерминации модели	0,98
Результат тестирования ARCH на наличие авторегрессионной изменчивости условной дисперсии	Авторегрессионная изменчивость условной дисперсии отсутствует
Результат теста на присутствие автокорреляции остатков модели (PACF)	Автокорреляция остатков отсутствует
Результат теста на нормальность распределения остатков (по критерию хи-квадрат)	Остатки распределены нормально

Источник: рассчитано по данным Табл. 1, 2

Табл. 10 показывает результаты расчета коэффициентов эластичности для моделей 1–7 Табл. 2. Данный расчет произведен чтобы сравнить силу влияния экзогенных переменных на эндогенную переменную (коэффициенты эластичности упорядочены по убыванию).

Таблица 10. Коэффициенты эластичности для моделей 1–7 Табл. 2.

Экзогенная переменная для расчета коэффициента эластичности/номер модели	Коэффициент эластичности, %
$OBSH_PARK_PV_{t-12}/6$	8,44
$RABOCH_PARK_PV_{t-12}/7$	3,39
$CENA_PV_ST_{t-1}/1$	2,64
$RABOCH_PARK_PV_{t-5}/7$	1,43
$CENA_PV_INN_{t-1}/2$	1,04
$CENA_VAG_KOMPL_{t-1}/3$	0,44
$CENA_TR2_t/4$	0,31
$PROIZV_PV_{t-3}/5$	0,12
$PROIZV_PV_{t-7}/5$	0,12
$CENA_DR_S_ZP_t/4$	-0,46
$RABOCH_PARK_PV_t/7$	-1,10
$OBSH_PARK_PV_t/6$	-8,44

Источник: рассчитано на основе Табл. 1–9

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим полученные результаты данного исследования.

Согласно Табл. 3 увеличение отпускной цены на новые полувагоны (стандартные) на 1 млн. руб. за вагон в момент времени $t-1$ (предыдущий месяц) приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 762,6 руб. за вагон в сутки в момент времени t (текущий месяц). Из Табл. 4 следует, что увеличение отпускной цены на новые полувагоны (инновационные) на 1 млн. руб. за вагон в момент времени $t-1$

приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 269,8 руб. за вагон в сутки в момент времени t .

Согласно данным Табл. 5 увеличение средней цены на новый вагон-комплект на 1 тыс. руб. в момент времени $t-1$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 0,32 руб. за вагон в сутки в момент времени t . При этом влияние изменения средней цены на новый вагон-комплект в момент времени t на эндогенную переменную не выявлено: коэффициент b_1 модели 3 статистически незначим.

В соответствии с данными, приведенными в Табл. 6, увеличение средней стоимости ремонта грузовых вагонов в объеме ТР-2 на 1 тыс. руб. за вагон в момент времени t приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 9,54 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Из Табл.6 также следует, что увеличение средней стоимости ремонта грузовых вагонов в объеме ДР (с учетом стоимости запасных частей) на 1 тыс. руб. за вагон в момент времени t приводит к среднему абсолютному снижению средней ставки аренды на полувагоны на 1,76 руб. за вагон в сутки в момент времени t (данный результат требует дальнейших исследований). Средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме ТР-1 и средняя стоимость ремонта грузовых вагонов в объеме КР (с учетом стоимости запасных частей) в момент времени t не оказывают статистически значимого влияния на эндогенную переменную: коэффициенты b_1 и b_4 модели 4 статистически незначимы.

Согласно данным Табл. 7 увеличение производства полувагонов в РФ на 1 ед. в момент времени $t-3$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 0,06 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Также увеличение производства полувагонов в РФ на 1 ед. в момент времени $t-7$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 0,06 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Другие временные лаги рассматриваемой экзогенной переменной (на протяжении периода в 12 месяцев) не оказывают статистически значимого влияния на эндогенную переменную: коэффициенты данных временных лагов при включении их в модель 5 статистически незначимы. Очевидно, что имеется определенная сезонность влияния рассматриваемой экзогенной переменной на эндогенную переменную. При этом рост средней ставки аренды на полувагоны в момент времени t при росте производства полувагонов в моменты времени $t-3$ и $t-7$ может быть объяснен тем, что производство полувагонов увеличивается как реакция на увеличение спроса на полувагоны и именно последнее постепенно, через 3 и 7 месяцев ведет к увеличению средней ставки аренды.

Согласно Табл. 8 увеличение общего парка полувагонов на сети РЖД на 1 тыс. ед. в момент времени t приводит к среднему абсолютному

снижению средней ставки аренды на полувагоны на 20,06 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Также увеличение общего парка полувагонов на сети РЖД на 1 тыс. ед. в момент времени $t-12$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 19,20 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Иные временные лаги рассматриваемой экзогенной переменной (на протяжении периода в 12 месяцев) не оказывают статистически значимого влияния на эндогенную переменную: коэффициенты данных временных лагов при включении их в модель 6 статистически незначимы. Рост средней ставки аренды на полувагоны в момент времени t при увеличении общего парка полувагонов на сети РЖД в момент времени $t-12$ может быть объяснен аналогично модели 5: увеличение общего парка происходит в результате увеличения спроса на полувагоны, последнее ведет к росту средней ставки аренды через 12 месяцев.

Согласно данным Табл. 9 увеличение рабочего парка полувагонов на сети РЖД на 1 тыс. ед. в момент времени t приводит к среднему абсолютному снижению средней ставки аренды на полувагоны на 3,09 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Также увеличение рабочего парка полувагонов на сети РЖД на 1 тыс. ед. в момент времени $t-5$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 3,92 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Увеличение рабочего парка полувагонов на сети РЖД на 1 тыс. ед. в момент времени $t-12$ приводит к среднему абсолютному росту средней ставки аренды на полувагоны на 8,68 руб. за вагон в сутки в момент времени t . Другие временные лаги рассматриваемой экзогенной переменной (на протяжении периода в 12 месяцев) не оказывают статистически значимого влияния на эндогенную переменную: коэффициенты данных временных лагов при включении их в модель 7 статистически незначимы. Наблюдается некоторая сезонность влияния рассматриваемой экзогенной переменной на эндогенную переменную. Рост средней ставки аренды на полувагоны в момент времени t при увеличении рабочего парка полувагонов на сети РЖД в моменты времени $t-5$ и $t-12$ может быть объяснен аналогично моделям 5 и 6: увеличение рабочего парка происходит в результате увеличения спроса на полувагоны, последнее ведет к росту средней ставки аренды через 5 и 12 месяцев.

Данные Табл. 10 по коэффициентам эластичности свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на динамику средней ставки аренды на полувагоны в момент времени t оказывает динамика общего парка полувагонов на сети РЖД (в моменты времени t и $t-12$), рабочего парка полувагонов на сети РЖД (в момент времени $t-12$), отпускной цены на новые полувагоны (стандартные) (в момент времени $t-1$). Наименьшее влияние на динамику средней ставки аренды на полувагоны в момент времени t оказывает динамика производства полувагонов в РФ (в моменты

времени $t-3$ и $t-7$), средней стоимости ремонта грузовых вагонов в объеме ТР-2 (в момент времени t).

Из представленных данных следует, что средняя ставка аренды на полувагоны в текущий момент времени (момент времени t) чувствительна к изменению влияющих на нее показателей в моменты времени t и $t-1$ и эта чувствительность хорошо объяснима на основе экономической логики (к примеру, рост цены на полувагоны ведет к повышению ставки аренды). С увеличением временного лага показателей такая чувствительность исчезает или начинает испытывать на себе влияние иных, неучтенных в построенных моделях показателей (к примеру, рост производства полувагонов в моменты времени $t-3$ и $t-7$ при предположительном росте спроса на полувагоны сопровождается ростом ставки аренды в момент времени t).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании были выделены показатели подвижного состава, влияющие на величину вагонной составляющей грузового железнодорожного тарифа, разработана классификация этих показателей по критерию применимости денежного измерителя (стоимостные и нестоимостные показатели подвижного состава). Произведена эконометрическая количественная оценка влияния выделенных показателей на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа, сделаны выводы по чувствительности последней к различным временным лагам рассматриваемых показателей (на примере полувагонов, на основе данных за 2018-2021 г. в РФ). Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования тарифной политики на грузовом железнодорожном транспорте, а также для дальнейшего развития теоретических основ в данной сфере.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Хусаинов Ф.И. Рынок железнодорожных грузовых перевозок в первом полугодии 2021 г. // Экономика железных дорог. – 2021. – №8. – С. 67–83. [Khusainov FI. Rynok zheleznodorozhnykh gruzovykh perevozok v pervom polugodii 2021 g. *Railway Economy*. 2021;8:67-83. (In Russ.)]. Доступно по: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/direct/499496955.pdf> Ссылка активна на: 23.10.2022.
2. Гайнутдинов Т.Р., Голиков С.Д. Ставки аренды на полувагоны: факторы влияния и прогноз среднесрочной ставки // Экономика и предпринимательство – 2020. – № 9(122). – С. 1002–1005. [Gainutdinov TR,

- Golikov SD. Gondola rental rates: factors of influence and forecast of the medium-term rate. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2020;9(122):1002-1005. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 23.10.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43998959>
3. Ожерельева М.В. Повышение экономической эффективности перевозок каменного угля на экспорт // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2016. – №11. – С. 53–56. [Ozhereleva MV. Increase of economic efficiency of coal transportation for export. *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)*. 2016;11:53-56. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27346596> Ссылка активна на: 23.10.2022.
 4. Годованый К.А., Колесников М.В. Технологический аутсорсинг как инструмент развития рынка операторских компаний // Известия Транссиба. – 2020. – №3(43). – С. 97–107. [Godovany KA, Kolesnikov MV. Technological outsourcing as a tool for market development of operator companies. *Izvestiya Transsiba*. 2020;3(43):97-107. (In Russ.)]. Доступно по: <http://izvestia-transsiba.ru/releases/107-2020-3/1177-tekhnologicheskij-autsorsing-kak-instrument-razvitiya-rynka-operatorskikh-kompanij> Ссылка активна на: 23.10.2022.
 5. Еловой И.А., Осипенко Л.В. Обоснование уровня вагонной составляющей тарифа в условиях дефицита вагонов инвентарного парка на Белорусской железной дороге / Труды VI Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления». 04–05 февраля 2022 года, Ростов-на-Дону. Издательство: Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону), 2022. – С. 48–52. [Elovoy IA, Osipenko LV. Justification of the level of the car component of the tariff in the conditions of a shortage of cars in the inventory of the Belarusian railroad In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Transport and Logistics: Actual Problems of Strategic Development and Operational Management”. February 04–05, 2022, Rostov-on-Don. Publisher: Rostov State University of Communications (Rostov-on-Don), 2022. pp. 48-52. (In Russ.)]. Ссылка активна на 23.10.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49428111>
 6. Winston C. The success of the Staggers Rail Act of 1980. Brookings. <https://www.brookings.edu/research/the-success-of-the-staggers-rail-act-of-1980/>. Published July 28, 2016. Accessed October 23, 2022.
 7. Casavant K, Jessup E, Prater ME, et al. Rail rate and revenue changes since the Staggers Act. *Journal of the Transportation Research Forum*. 2012;50(1). doi: 10.5399/osu/jtrf.50.1.2661
 8. Wijeweera A, To H, Charles M. An empirical analysis of Australian freight rail demand. *Economic Analysis and Policy*. 2014;44(1):21-29. doi: 10.1016/j.eap.2014.01.001
 9. Волкова Е.М., Стримовская А.В. Влияние логистических затрат на финансовые показатели работы компании // Логистика и управление цепями поставок. – 2018. – № 5. – С. 53–61. [Volkova EM, Strimovskaya AV. Influence of Logistics Costs on a Company’s Financial Performance Indicators. *Logistics and Supply Chain Management*. 2018;5:53-61. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 23.10.2022. Доступно по: <http://lscm.ru/images/PDF/5-2018/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0-05-2018.pdf>

10. Чеченова Л.М. Решения для оптимизации эксплуатационных расходов на железнодорожном транспорте // Вопросы новой экономики. – 2021. – №2(58). – С. 61–66. [Chechenova LM. Solutions for optimizing operating costs in the railway transport. *Issues of New Economy*. 2021;2(58):61-66. (In Russ.)]. Доступно по: https://disk.yandex.ru/d/hUxt-KT_RHPKdQ/archive/2-58-2021.pdf Ссылка активна на: 23.10.2022.
11. Журавлева Н.А. Влияние постпандемийной экономики на бизнес-модель транспортных организаций // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – №3–4(88–89). – С. 20–23. [Zhuravleva NA. Influence of the post-pandemic economy on transport organisations' business model. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2020;3-4(88-89):20-23. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 23.10.2022. Доступно по: <http://rostransport.com/transportrf/archiv/text.php?ID=&pdf=40270>
12. Гулый И.М. Влияние цифровой трансформации на структуру себестоимости транспортных услуг // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – №4(95). – С. 16–18. [Gulyi IM. Influence of digital transformation on the cost structure of transport services. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2021;4(95):16-18. (In Russ.)]. Доступно по: <http://rostransport.com/transportrf/archiv/text.php?ID=&pdf=41529> Ссылка активна на: 23.10.2022.
13. Обзоры работы железнодорожной отрасли за 2013-2021 гг., аналитика Союза операторов железнодорожного транспорта. [Obzory raboty zheleznodorozhnoy otrasli za 2013-2021 gg, analitika Soyuza operatorov zheleznodorozhnogo transporta. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 23.10.2022. Доступно по: <http://www.railsovet.ru/analytics/obzor/>
14. Cochran D, Orcutt GH. Application of least squares regression to relationships containing auto- correlated error terms. *Journal of the American Statistical Association*. 1949;44(245):32. doi: 10.2307/2280349
15. Ramanathan R, Ramanathan R. *Introductory Econometrics with Applications*. New Delhi, India: South-Western, a division of Thomson Learning; 2008.

Сведения об авторе:

Егоров Юрий Владимирович, кандидат экономических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 4902-5477; ORCID: 0000-0003-1485-4042;
E-mail: orion56@mail.ru

Information about the author:

Yuriy V. Egorov, Candidate of Sciences (Economics);
eLibrary SPIN: 4902-5477; ORCID: 0000-0003-1485-4042;
E-mail: orion56@mail.ru

Цитировать:

Егоров Ю.В. Влияние показателей подвижного состава на вагонную составляющую грузового железнодорожного тарифа (на примере полувагонов) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 140–153. doi: 10.17816/transsyst202284140-153

To cite this article:

Egorov YV. The influence of rolling stock indicators on the car component of the freight railway tariff (by the example of gondel cars). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):140-153. doi: 10.17816/transsyst202284140-153

2022;8(4)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

30.12.2022

153 страницы Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9