

# ИННОВАЦИОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

MODERN  
TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGIES  
peer-review journal

[transsyst.ru](http://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, № 3

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**, Ведущий научный сотрудник Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок 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 3

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**, Leading Researcher, 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.

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>		<b>TABLE OF CONTENTS</b>
<b>ОБЗОРЫ</b>		<b>REVIEWS</b>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения</p> <p>Еникеев А.И., Катикова А.С., Аверченко Г.А.</p> <p>Методы натурного обследования убежищ гражданской обороны вокзальных комплексов города Москвы</p>	5	<p>Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS Field – Bases and foundations, underground structures</p> <p>Enikeev A.I., Katikova A.S., Averchenko G.A.</p> <p>Methods of full-scale survey of shelters of civil defense of railway complexes of the city of Moscow</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Чеченова Л.М.</p> <p>Внедрение технологического решения и оценка результативности бережливого производства при проведении путевых работ</p>	20	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Chechenova L.M.</p> <p>Implementation of a technological solution and evaluation of the effectiveness of lean manufacturing during track work</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА Никонова Я.И., Проскурякова Е.А.</p> <p>Цифровизация железнодорожных вокзальных комплексов</p>	31	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS Nikonova Y.I., Proskuryakova E.A.</p> <p>Digitalization of railway station complexes</p>
<b>ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ</b>		<b>ORIGINAL STUDIES</b>
<p>Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей</p> <p>Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Цырлин М.И.</p> <p>Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ)</p>	45	<p>Rubric 1. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels</p> <p>Unitsky A.E., Khlebus A.S., Tsyrlin M.I.</p> <p>Evaluation of flexible rail rigidity and stress-strain state of elements of string rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE)</p>
<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>Моделирование динамических характеристик магнитолевитационной транспортной платформы в процессе движения, разгона и торможения</p>	63	<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>Simulation of the maglev suspension dynamic characteristics during movement, acceleration and deceleration</p>

<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Соломин В.А., Соломин А.В., Колмыкова М.Ю., Чехова А.А.</p> <p>Тормозные усилия тягового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента</p>	78	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Solomin V.A., Solomin A.V., Kolmykov M.Yu., Chekhova AA.</p> <p>Braking forces of a traction linear induction motor with an adjustable resistance of a short-circuited winding of the secondary element</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Шандыбин А.В.</p> <p>Моделирование электромагнитного взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса</p>	89	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Shandybin A.V.</p> <p>The simulation of electromagnetic interaction of the components of transport electrical complex</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Казымов И.М., Компанец Б.С.</p> <p>Разработка системного подхода к регулированию и настройке установок индукционного нагрева повышенной частоты для нужд электротермии</p>	105	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Kazymov I.M., Kompaneets B.S.</p> <p>Development of a systematic approach to the regulation and adjustment of high- frequency induction heating unit for the needs of electrothermy</p>
<p>Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ Направление – Электротехнология и электрофизика</p> <p>Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н.</p> <p>Особенности построения системы управления магнитным подвесом грузовой платформы</p>	123	<p>Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS Field – Electrotechnology and electrophysics</p> <p>Kireev A.V., Kozhemyaka N.M., Kononov G.N.</p> <p>The design of the magnetic suspension control system cargo platform</p>
<p>Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА</p> <p>Смирнов С.А., Смирнова О.Ю.</p> <p>Особенности оценки социально- экономических эффектов, возникающих в результате строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта</p>	142	<p>Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS</p> <p>Smirnov S.A., Smirnova O.Yu.</p> <p>Features of the assessment of socio-economic effects arising from the construction of lines of freight maglev transport</p>

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Основания и фундаменты, подземные сооружения

УДК [UDC] 699.852

DOI 10.17816/transsyst2022835-19

© А.И. Еникеев, А.С. Катикова, Г.А. Аверченко

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

## МЕТОДЫ НАТУРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ УБЕЖИЩ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ ВОКЗАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГОРОДА МОСКВЫ

**Обоснование:** Безопасность государства – приоритетная задача в современных условиях. Транспортная отрасль, как одна из важнейших для обеспечения устойчивого функционирования государства, требует особого внимания. Велика значимость выработки различных научных подходов для их практического применения в обеспечении безопасности на транспорте. Вокзальные комплексы являются местами повышенного скопления людей, поэтому поддержание всех их элементов в надлежащем состоянии чрезвычайно важно.

Визуальное обследование фактического технического состояния (натурный осмотр и обмеры) конструктивных элементов (сопряжений, стыков плит перекрытий, узлов, швов) бомбоубежищ вокзальных комплексов проводится современными методами с целью выявления имеющихся дефектов, повреждений и оценки степени их влияния на безопасность, долговечность и ремонтпригодность бомбоубежища.

В статье помещено описание конструкции элементов подземных сооружений гражданской обороны, а именно: плиты перекрытия, несущие элементы бомбоубежища, внутренняя гидроизоляция, специальное инженерное оборудование. Оценивается состояние данных элементов бомбоубежища на момент обследования, дается характеристика имеющихся дефектов и повреждений. Основными дефектами являются выщелачивание бетона с оголением арматуры, трещины и сколы бетона, отсутствие современной гидроизоляции, частичное разрушение несущих конструкций.

На основании полученных результатов формулируются рекомендации по дальнейшей эксплуатации сооружения. А также предлагается комплекс мероприятий по устранению существующих нарушений и дальнейшей эксплуатации подземного сооружения. Рекомендован комплекс работ по ремонту отдельных узлов и конструкций: оклейка сооружения современными гидроизоляционными материалами, устранение мелких повреждений железобетонных конструкций, восстановление защитного слоя бетона до проектных значений.

**Цель:** рассмотрение методов натурального обследования бомбоубежищ, подземных сооружений и их применение; определение технического состояния сооружения; разработка рекомендаций для дальнейшей эксплуатации.

**Материалы и методы:** в качестве материалов и исходных данных было проанализировано убежище № 6 в г. Москве, проведена фиксация дефектов.

Был использован натуральный метод как основной: сбор и анализ предварительной информации о сооружении, обмеры конструкций, визуальное освидетельствование конструкций, описаны основные дефекты, установлены причины возникновения, дан прогноз развития и рекомендации по устранению имеющихся повреждений.

Большой акцент в статье сделан на визуальное освидетельствование и оценку повреждений: оголение арматуры и некачественная гидроизоляция, выщелачивание бетона в местах контакта с грунтовой водой, корродирование арматуры в железобетоне, частичное обрушение конструкций и т.д.

**Результаты:** в результате проведенных обследований, был составлен рекомендационный список для приведения технико-экономических показателей сооружения в нормативное состояние.

**Заключение:** по итогам обследования рекомендуется выполнить строительномонтажные работы на стадии «Ремонт».

**Ключевые слова:** обследование бомбоубежищ, бомбоубежища, железобетон, натурное обследование, выявление дефектов подземных сооружений, устранение дефектов, подземные сооружения, объект ГОЧС.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Bases and foundations, underground structures

© **A.I. Enikeev, A.S. Katikova, G.A. Averchenko**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(St. Petersburg, Russia)

## **METHODS OF FULL-SCALE SURVEY OF SHELTERS OF CIVIL DEFENSE OF RAILWAY COMPLEXES OF THE CITY OF MOSCOW**

**Background:** The security of the state is a priority task in science in modern conditions. Transportation area as one of the most important areas for the state sustainable functioning, requires the special attention. It is very important to research scientific approaches and their implementation for providing security at transport. Due to the large concentration of passengers at station complexes, special attention should be paid to keeping them in working condition.

Visual inspection of the actual technical condition (full-scale inspection and measurement) of all structural elements (joints, joints of floor slabs, nodes, joints) of a bomb shelter is carried out to identify existing defects, damages and assess their impact on the safety, durability and serviceability of the bomb shelter.

The article contains a description of the construction of civil defence underground structures, namely: floor slabs, bomb shelter load-bearing elements, internal waterproofing, and special engineering equipment. The condition of these elements of the bomb shelter at the time of the survey is evaluated, and the existing defects and damages are characterized. The main defects are concrete leaching with exposed reinforcement, cracks and spalling of concrete, lack of modern waterproofing, partial destruction of supporting structures.

Based on the results, recommendations for further operation of the structure are formulated. And also proposed a set of measures to eliminate existing violations and further exploitation of underground structures. Recommended a set of works to repair the individual components and structures: pasting modern waterproofing materials, the elimination of minor damages to reinforced concrete structures, restoration of the protective layer of concrete to its design values.

**Aim:** consideration of methods of full-scale examination of bomb shelters, nderground structures and their application; definition of the technical condition of the structure; development of recommendations for further operation.

**Materials and Methods:** As a material and input data, asylum No. 6 in Moscow was analyzed, fixing of defects was carried out.

The field method was used as the main one: collection and analysis of preliminary information about the structure, measurement of structures, visual inspection of structures, description of the main defects, establishment of causes, forecast of development and recommendations on elimination of the existing damages.

The article puts more emphasis on the visual inspection and assessment of damages: denudation of reinforcement and poor quality waterproofing, leaching of concrete at the points of contact with ground water, corrosion of reinforcement in reinforced concrete, partial collapse of structures, etc.

**Results:** As a result of the surveys, a recommendation list was compiled to bring the technical and economic indicators of the structure to the standard state.

**Conclusion:** according to the results of the survey, it is recommended to perform construction and installation work at the stage of "Repair"

**Key words:** inspection of bomb shelters, bomb shelters, reinforced concrete, natural inspection, detection of defects in underground premises, elimination of defects, underground structures, civil defense emergency facility.

## ВВЕДЕНИЕ

В годы «холодной» войны (1945-1991гг.) в условиях возможного применения оружия массового поражения в нашей стране на предприятиях, ответственных государственных объектах и в местах массового пребывания людей было построено большое количество убежищ гражданской обороны. Качество строительства этих объектов было невысоким и не всегда соответствовало нормативным требованиям. Эксплуатировались они в неблагоприятных условиях, несвоевременно выполняли их ремонт. В последнее 10-летие из-за финансовых трудностей, деления крупных предприятий на более мелкие и по ряду других причин содержанию убежищ не уделялось достаточного внимания, и многие из них пришли в неудовлетворительное и даже в ветхое состояние.

Нестабильность международной обстановки последних лет и рачительное хозяйствование обуславливает необходимость содержания бывших убежищ гражданской обороны в исправном состоянии. В этой связи авторами были выполнены детальные обследования ряда убежищ разных лет постройки, вместимости и конструктивных решений для определения технического состояния и возможности дальнейшей эксплуатации по назначению.

Характерной особенностью убежищ является их заглубленное расположение ниже поверхности грунта, что способствует увлажнению и препятствует естественной сушке стен, покрытия и полов. Поэтому в мирное время должна производиться хорошая вентиляция таких

помещений. Во всех обследованных убежищах естественная вентиляция отсутствовала, а механическая принудительная находилась в нерабочем состоянии. По этим причинам строительные конструкции убежищ находятся в переувлажненном состоянии, на стенах и перекрытиях образовались конденсат и плесень, элементы защитно-герметических дверей и другое оборудование подвержено значительной коррозии. Увлажнение конструкций убежищ происходит как от грунтовых вод, так и из-за течей неисправных сетей инженерно-технического обеспечения.

### ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИНЯТЫЕ В СТАТЬЕ

Для наименования процесса, установленного несоответствия или отклонения от проектной или нормативной документации в данном отчёте используются следующие определения:

Диагностика – установление и изучение признаков, характеризующих состояние строительных конструкций зданий и сооружений для определения возможных отклонений и предотвращения нарушений нормального режима их эксплуатации (СП 13-102-2003).

Обследование – комплекс мероприятий по определению и оценке фактических значений контролируемых параметров, характеризующих эксплуатационное состояние, пригодность и работоспособность объектов обследования и определяющих возможность их дальнейшей эксплуатации или необходимость восстановления и усиления (СП 13-102-2003).

Ограниченно работоспособное состояние – категория технического состояния конструкций, при которой имеются дефекты и повреждения, приведшие к некоторому снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения и функционирование конструкции возможно при контроле ее состояния, продолжительности и условий эксплуатации. (СП 13-102-2003).

Несущие конструкции – строительные конструкции, воспринимающие эксплуатационные нагрузки и воздействия и обеспечивающие пространственную устойчивость здания. (СП 13-102-2003).

Дефект – отдельное несоответствие конструкций какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом (СП, ГОСТ, ТУ, СН и т.д.) (СП 13-102-2003).

Повреждение – неисправность, полученная конструкцией при изготовлении, транспортировании, монтаже или эксплуатации (СП 13-102-2003).

Трещина – полость, образованная без удаления материала двумя соединенными внутри тела поверхностями, которые при отсутствии в нем напряжений удалены друг от друга на расстояния, во много раз меньше протяженности самой полости.

Выщелачивание бетона – под выщелачиванием понимают процесс растворения и выноса гидроокиси кальция  $\text{Ca}(\text{OH})$  из тела бетона фильтрующейся через его толщину водой. (СО 34.21.667).

Оценка технического состояния – установление степени повреждения и категории технического состояния строительных конструкций или зданий и сооружений в целом на основе сопоставления фактических значений количественно оцениваемых признаков со значениями этих же признаков, установленных проектом или нормативным документом (СП 13-102-2003).

Восстановление – комплекс мероприятий, обеспечивающих повышение эксплуатационных качеств конструкций, пришедших в ограниченно работоспособное состояние, до уровня их первоначального состояния (СП 13-102-2003).

Поверочный расчет – расчет существующей конструкции по действующим нормам проектирования с введением в расчет полученных в результате обследования или по проектной и исполнительной документации геометрических параметров конструкции, фактической прочности строительных материалов, действующих нагрузок, уточненной расчетной схемы с учетом имеющихся дефектов и повреждений (СП 13-102-2003).

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Большой вклад в развитие методов обследования бомбоубежищ внесли следующие авторы: Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Дмитриев А.С., Нигметов Г.М., Тонких Г.П. [1–4]. Так в этих статьях были рассмотрены наиболее частые причины возникновения дефектов в убежищах, различные методы оценивания этих повреждений.

Каждое искусственное инженерное сооружение требует постоянного мониторинга, с целью своевременного устранения дефектов. Именно поэтому, основные методы ликвидации различных видов повреждений были рассмотрены в статьях авторов: Хлобыстин С.И., Литвинова Н.А., Тонких Г.П., Козача В.М., Виноградов С.Д. [5–8].

Несомненно, основным аспектом в данной теме является непосредственная методика корректного проектирования данных сооружений, так в статьях авторов: Посохов Н.Н., Шульгин В.Н., Сломьянский В.П., Елизаров П.И., Жиркова Т.А., Гасымов Р.Р., Могильниченко Н.Ю. [9–12] были детально описаны основные способы проектирования надежных конструкций убежищ, а также рассмотрены аспекты совершенствования и усиления, уже существующих защитных сооружений.

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЯ

В статье было рассмотрено несколько убежищ. В результате исследования можно выделить следующие конструктивные и объемно-планировочные решения, используемые при проектировании данного вида сооружений.

Помещения убежищ подразделяются на основные и вспомогательные. К основным помещениям относятся помещения для укрываемых, пункты управления, медицинские пункты, а в убежищах лечебных учреждений – операционно-перевязочные, предоперационно-стерилизационные. К вспомогательным помещениям относятся фильтровентиляционные помещения, санитарные узлы, помещения для защищенных дизельных электростанций, электрощитовые, помещения для хранения продовольствия, станции перекачки, баллонные, тамбур-шлюзы, тамбуры. В помещениях убежищ обеспечивается герметичность.

Системы вентиляции убежищ обеспечивают воздухообмен укрываемых в двух режимах: чистой вентиляции (режим I) и фильтровентиляции (режим II). Электроснабжение убежищ осуществляется от сети города (предприятия). В убежищах, оборудованных вентиляторами с электроприводом, предусматривается также автономное электроснабжение. В убежищах с режимом полной изоляции с регенерацией воздуха защищенный энергоисточник предусматривается независимо от их вместимости. Водоснабжение убежищ производится от наружной водопроводной сети с устройством, как правило, проточных емкостей запаса питьевой воды из расчета 3 л/сут на каждого укрываемого, с обеспечением полного обмена воды в течение 2 суток. Для канализации убежищ предусматривается устройство санитарных узлов с отводом вод в наружную канализационную сеть.

В убежищах устанавливаются средства связи и оповещения. Вход в них осуществляется через защищенные входы, имеющие лестничный спуск, пандус, предтамбур, тамбур-шлюз, двухкамерный шлюз, защитно-герметические и герметические двери. Защищенные входы могут быть тупиковыми, сквозняковыми, из лестничной клетки. В случае их завалов эвакуация людей, находящихся в убежищах, производится через аварийные выходы. Аварийный выход выполняется в виде тоннеля с внутренним размером  $1,2 \times 2$  м и с дверным проемом  $0,8 \times 1,8$  м.

Описываемые авторами подземные сооружения, бомбоубежище расположено в городе Москва и имеют схожие технические характеристики и одинаковые конструктивные особенности. На последующих фотографиях запечатлено бомбоубежище (защитное сооружение гражданской обороны) общей площадью  $137 \text{ м}^2$ . Толщина стен 100 см, толщина перекрытия 60 см, монолит железобетон. Площадь в пределах герметизации  $107,7 \text{ м}^2$ . Отопление водяное, местное.

Водоснабжение от городской сети и резервуаров общим объемом 0,6 м<sup>3</sup>. Канализация сливная, в общую городскую сеть. Энергоснабжение общее от двух источников питания, напряжением 220 В, резервное от самостоятельной дизельной установки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

В статье приведены результаты обследования нескольких убежищ в городе Москва. В статье помещено описание конструкции обследуемого сооружения, оценивается их состояние на момент обследования, дается характеристика имеющихся дефектов и повреждений, выполнена оценка прочности бетонных конструкций методом поверхностного прозвучивания. На основании полученных результатов формулируются рекомендации по дальнейшей эксплуатации, по ремонту или усилению несущих элементов конструкций.

В соответствии с нормативными требованиями в процессе строительства убежищ должна была выполняться надежная гидроизоляция стен и полов. Чаще всего она должна быть оклеечной, многослойной из биостойких и прочных материалов. В действительности на обследованных объектах гидроизоляция была выполнена из недолговечного и небиостойкого рубероида некачественно, а в отдельных случаях она вообще не устраивалась. Через 5–10 лет эксплуатации некачественные картон и бумажная основа рубероида сгнили, гидроизоляционное покрытие стало водопроницаемым. В результате фильтрации воды и увлажнения произошло выщелачивание и биологическое разрушение бетона, значительная коррозия арматуры. Характерным примером здесь является убежище одного из государственных учреждений в г. Москве, где через 8 лет после завершения строительства гидроизоляция и сами стены обильно пропускают грунтовые воды, идет процесс интенсивной коррозии железобетонных конструкций стен и перекрытий.

Увлажнение конструкций убежищ происходит также из-за подъема в городах уровня грунтовых вод после проектирования и строительства объекта, застройки и асфальтирования прилегающей территории, предотвращающих испарение грунтовой влаги. Так на площадке убежища № 6 после сдачи объекта в эксплуатацию в 1985 г. уровень грунтовых вод к 2021 г. поднялся на 1,3 м. и при сезонных колебаниях стал выше на 60 см пола убежища. Оклеечная гидроизоляция пола, выполненная из трех слоев рубероида, за время эксплуатации прогнила. Изоляция стен обмазкой битумом за два раза произведена с нарушением сплошности. Монолитный бетон полов плохо уплотнен, имеет многочисленные раковины, стыки сборных элементов стен некачественно зачеканены. Поэтому грунтовая вода относительно свободно фильтруется через полы и стыки стен, затапливая убежище. Наблюдения показали, что во время паводков подъем

уровня воды в убежище достигает 20 см в сутки. С такой же скоростью он и понижается.

Наибольшим повреждением подвержены конструкции убежищ, построенные в 60-е годы. Их стены и перекрытия обычно выполнены из монолитного бетона марки М-200 с некачественным уплотнением. В бетоне имеется большое количество больших и мелких раковин и технологических швов. За время эксплуатации их гидроизоляция полностью разрушена. Из-за выщелачивания и биологической коррозии прочность бетона снизилась до 50–100 кг/см<sup>2</sup>. При высокой влажности и проницаемости бетона произошла значительная коррозия арматуры. Так, например, в стенах и перекрытии убежища № 37, построенного в 1958 г., коррозия рабочей арматуры столь велика, что ее диаметр в настоящее время снизился до 4 мм, а некоторые стержни прокорродировали на все сечение (Рис. 1).



Рис. 1. Дефект, выщелачивание бетона

Перекрытия большинства убежищ выполнены сборно-монолитными: на балки или стены опираются сборные железобетонные плиты с гладкой нижней поверхностью, с устройством по верху монолитной плиты. Сборные плиты изготавливали с отступлением от требований норм без установки фиксаторов рабочей арматуры. Арматурные сетки укладывали непосредственно на дно опалубки. Поэтому защитный слой арматуры у них составляет всего лишь 0–5 мм вместо положенных 20–30 мм. В условиях высокой влажности убежищ при небольшом защитном слое происходит интенсивная коррозия арматуры. Продукты коррозии составляют 60–70 % от общего объема металла. Они распирают бетон и отслаивают его защитный слой. Процессы коррозии оголенной арматуры ускоряются (Рис. 2).

Такие повреждения авторами были установлены в конструкциях всех обследованных убежищ. Коррозия арматуры в сборных плитах перекрытий проявляется уже через 3–5 лет после строительства. При обследованиях установлены повреждения 30–70% плит – в зависимости от сроков и условий эксплуатации. В монолитных перекрытиях и стенах коррозия арматуры встречается в 3–4 раза реже и проявляется в меньшей степени (Рис. 3).



Рис. 2. Дефект, коррозия арматуры

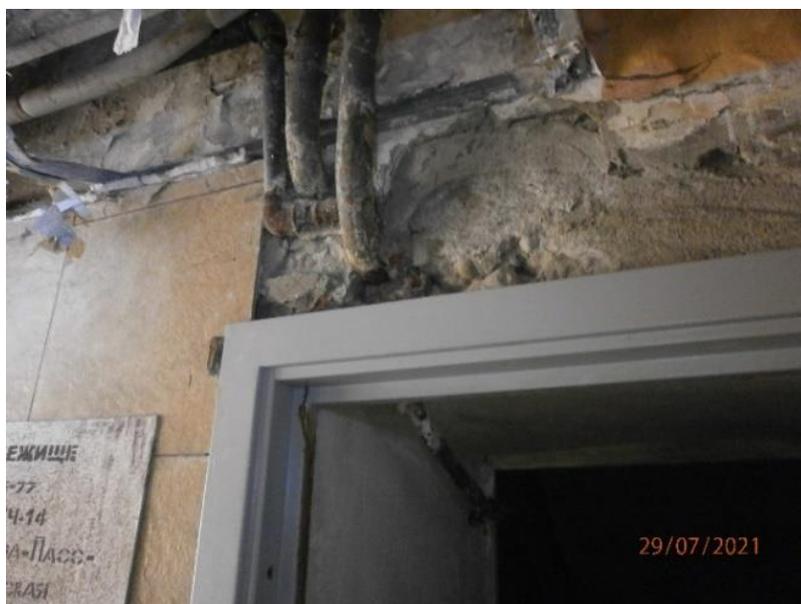


Рис. 3. Дефект, влияние переувлажнения на материалы отделки

Другими, менее значимыми повреждениями убежищ являются: трещины в полах и стыках сборных элементов стен и перекрытий, вызванные переувлажнением помещения и протечками из-за

ненадлежащего устройства гидроизоляции, ветхость отделки, неисправность и неукомплектованность инженерного оборудования (Рис. 4).

Авторами были выполнены статические и конструктивные поверочные расчеты всех поврежденных конструкций убежищ в соответствии с требованиями действующих СП на особые сочетания нагрузок: Установлено, что многие конструкции из-за снижения прочности бетона и коррозии арматуры не обладают достаточной несущей способностью и нуждаются в усилении.



Рис. 4. Дефект, переувлажнение помещения

Опыт эксплуатации железобетонных конструкций в аналогичных условиях показывает, что начавшиеся процессы коррозии бетона и арматуры прогрессируют при сохранении прежних условий эксплуатации. Даже в случае предотвращения увлажнения и обеспечения антикоррозионной защиты арматуры они могут еще продолжаться определенное время. В этой связи в самые короткие сроки необходимо выполнить восстановление гидроизоляции фундаментов, полов, стен и перекрытий, усиление конструкций, не обладающих достаточной несущей способностью, восстановление защитного слоя бетона до проектных значений и ряд других мероприятий.

Анализ объемов и стоимости ремонтно-восстановительных работ по усилению, восстановлению и антикоррозионной защите конструкций обследованных убежищ показал, что в ряде случаев материальные и трудовые затраты для этого превышают величину затрат на строительство новых объектов. Трудоемкость работ по усилению и восстановлению конструкций в стесненных условиях функционирующих зданий резко возрастает. Здесь также нужно учесть и моральный износ сооружений

старой постройки, а также, что усиленные и восстановленные конструкции имеют меньшую надежность и долговечность по сравнению с новыми конструкциями.

Авторами были обследованы наиболее поврежденные защитные сооружения гражданской обороны – убежища. Из-за технических сложностей и экономической нецелесообразности усиления и восстановления 2/3 из них было списано с учета, но после капитального ремонта возможна их эксплуатация по иному назначению. В остальных убежищах, где степень повреждения конструкций была невысокой, а выполнение ремонтно-восстановительных работ не вызвало больших трудностей, было рекомендовано осуществить усиление, восстановление и антикоррозионную защиту конструкций, а в дальнейшей эксплуатации поддерживать их в исправном состоянии и своевременно выполнять текущие и капитальные ремонты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на натурных обследованиях конструкций защитных сооружений в городе Москве, сделаны следующие выводы:

1. К конструктивным недостаткам обследуемого бомбоубежища следует отнести:

- снижение несущей способности несущих конструкций, вызванное выщелачиванием железобетонных плит перекрытия,
- оголение арматуры в плитах перекрытия.

2. Техническое состояние сооружений оценивается, как **ограниченно-работоспособное;**

3. Опасными дефектами, которые, являются критичными для системы жизнеобеспечения убежища:

- отсутствие двух источников питания, резервного и основного,
- отсутствие освещения,
- отсутствие накопительных резервуаров на 600 литров,
- несоответствие систем отопления сооружений согласно паспортам объектов.

4. Для восстановления существующих технико-экономических показателей бомбоубежища необходимо рекомендовать выполнение комплекса работ по ремонту отдельных элементов конструкций. Планируемые строительные-монтажные работы на стадии «Ремонт»:

- восстановления систем жизнеобеспечения согласно паспорту объекта;
- повторное устройство гидроизоляции по всему объёму помещения;
- проведение работ по замене инженерных коммуникаций;
- устранение деформационных трещин в полах и стыках сборных элементов стен и перекрытий.

**Авторы заявляют, что:**

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

**Рекомендации к публикации**

Кандидат военных наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Новик Анатолий Николаевич и редакция журнала «Инновационные транспортные системы и технологии» рекомендуют данную статью к публикации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References**

1. Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Прошляков М.Ю., Папелков Д.И. Проблемы оценки защитных свойств убежищ гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 2(6). – С. 92–96. [Shakhramanyan MA, Nigmatov GM, Proshlyakov MY, Papelkov DI. Problems of assessment of protective properties of civil defense shelters. *Technologies of civil safety* 2004;2(6):92-96. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 30.06.2022. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otsenki-zaschitnyh-svoystv-ubezhisch-grazhdanskoj-oborony/viewer>
2. Дмитриев А.С., Поморов С.Б., Сидоров В.А. Убежище гражданской обороны и его жилая среда // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – 2011. – № 1–2. – С. 85–92. [Dmitriev AS, Pomorov SB, Sidorov VA. Civil defense shelter and its living environment. *Bulletin of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov*. 2011;1-2:85-92. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34109607&ysclid=17m3ptqquy208931021> Ссылка доступна на: 30.06.2022.
3. Нигметов Г.М. Проблемы инженерной защиты населения в условиях воздействия современных средств поражения. Оценка защитных свойств убежищ гражданской обороны // Проблемы развития и совершенствования гражданской обороны Российской Федерации в современных условиях. Всероссийская конференция: 8-9 апреля 2004 года. Сборник материалов. – Москва, 2004. – С. 91–94. [Nigmatov GM. Problems of engineering protection of population under the impact of modern means of destruction. Evaluation of protective properties of civil defense shelters. *Problems of development and improvement of civil defense of the Russian Federation in modern conditions. All-Russian Conference: April 8-9, 2004. Collection of materials*. 2004; 91-94 p. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 30.06.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15131240&ysclid=17m3wci1um595064084>
4. Тонких Г. П. Основные положения по оценке готовности защитных сооружений гражданской обороны // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 3-х частях, Москва, 2020. – С. 120–128. [Tonkikh G.P. The basic provisions for assessing the readiness of protective structures of civil defense. *Civil Defense on the guard of peace and security: Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference dedicated to the World Day of Civil Defense. In 3 parts, Moscow*. 2020; pp.120-128 (In Russ.)]. Доступно по:

- <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45611715&ysclid=17m44hnzod367479814> Ссылка доступна на: 30.06.2022.
5. Хлобыстин С.И. О некоторых аспектах эксплуатации защитных сооружений гражданской обороны и обеспечения ими различных категорий населения // Технологии гражданской безопасности. – 2022. – Т. 19. – № 1(71). – С. 82–86. [Khlobystin SI. On some aspects of the operation of protective structures of civil defense and their provision of various categories of the population. *Technologies of civil security*. 2022;19(1,71):82-86 (In Russ.)]. doi: 10.54234/CST.19968493.2022.19.1.71.17.82
  6. Литвинова Н.А. Инженерная защита в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – 102 с. [Litvinova NA. Engineering protection in emergency situations: a training manual. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2021; 102 p. (In Russ.)]. Доступно по: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_07000471708/?ysclid=17nmjx78ap29762061](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_07000471708/?ysclid=17nmjx78ap29762061) Ссылка доступна на: 30.06.2022.
  7. Тонких Г.П., Козача В.М. Мероприятиям по совершенствованию защитных сооружений гражданской обороны в современных условиях // Международная гуманитарная помощь: опыт, реалии, перспективы. Актуальные вопросы формирования культуры безопасности населения (международные аспекты). XXIII Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: Материалы конференции, Ногинск, 07 июня 2018 года / ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). – Ногинск: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2018. – С. 539–551. [Tonkikh GP, Kozacha VM. Measures to improve the protective structures of civil defense in modern conditions // International humanitarian aid: experience, realities, prospects. Actual questions of formation of safety culture of population (international aspects). XXIII International scientific and practical conference on the problems of protection of population and territories from emergencies : Conference materials, Noginsk, June 07, 2018 / FGBU VNI GOCHS (FC). Noginsk: All-Russian research institute on the problems of civil defense and emergency situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2018. pp. 539-551 (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 30.06.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?ysclid=17nmuy5rus947844837&id=36661069>
  8. Виноградов С.Д. Инженерная защита населения на современном этапе гражданской обороны // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2013. – Т. 3. – № 1(4). – С. 206–212. [Vinogradov SD. Engineering Protection of Population at the Present Stage of Civil Defense *Civil Defense Strategy: Problems and Studies* 2013;3(1,4):206-212. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 30.06.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18891918&ysclid=17nn0w2xm3191323379>
  9. Посохов Н.Н. Проектирование защитных сооружений гражданской обороны в условия актуализации СНиП и ГОСТ // Опыт ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в России и за рубежом: Материалы XIX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, Москва, 20–23 мая 2014 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2014. – С. 306–315. [Posokhov NN. Design of Civil Defense Protective Facilities in the Conditions of Updating SNiP and GOST. Experience of Large-Scale Emergency Response in Russia and Abroad: Materials of XIX International Scientific and Practical Conference on Problems of Population and Territories Protection from Emergency Situations, Moscow, May 20-23, 2014. Moscow: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the

- Ministry of Emergency Situations of Russia; 2014. pp. 306-315. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29013353&ysclid=17nn4umrj3685263576> Ссылка доступна на: 30.06.2022.
10. Шульгин В.Н., Сломьянский В.П., Елизаров П.И. Основы инвентаризации и обследования зданий, помещений и защитных сооружений гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. – 2006. – Т. 3. – № 2(10). – С. 133–136. [Shulgin VN, Slomiansky VP, Elizarov PI. Fundamentals of inventory and inspection of buildings, premises and protective structures of civil defense. *Technologies of civil security*. 2006;3(2,10):133-136. (In Russ.)] Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12690441&ysclid=17nnd37nz897622755> Ссылка доступна на: 30.06.2022.
  11. Truong-Hong L, Laefer DF. Laser scanning for bridge inspection *Laser Scanning*. 2019;189-214. doi: 10.1201/9781351018869-12
  12. Жиркова Т.А. Основные аспекты совершенствования и приведения в готовность защитных сооружений гражданской обороны // Вестник НЦБЖД. – 2014. – № 4(22). – С. 115–119. [Zhirkova TA. The main aspects of improving and making ready the protective structures of civil defense. *Bulletin of the National Center for Civil Defense*. 2014;4(22):115-119. (In Russ.)]. Ссылка доступна на: 30.06.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22823635&ysclid=17nnmosozh15699353>
  13. Гасымов Р.Р., Могильниченко Н.Ю. Усиление строительных конструкций при приспособлении подвальных помещений под укрытия // Проблемные вопросы инженерной защиты населения и территорий: Сборник трудов секции № 2 XXX Международной научно-практической конференции, Химки, 19 марта 2020 года. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2020. – С. 45–51. [Gasymov RR, Mogilnichenko NY. Strengthening building structures when adapting basement premises under shelters. Problems of engineering protection of population and territories: Proceedings of the section number 2 XXX International Scientific-Practical Conference, Khimki, March 19, 2020. Khimki: Academy of Civil Defense of EMERCOM of Russia; 2020. pp. 45-51. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43088015&ysclid=17npursm1v565554605> Ссылка доступна на: 30.06.2022.
  14. Аверченко Г.А., Васильев К.А., Рудакова Е.А. и др. Регулирование усилий в балочно-вантовых системах // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 5–13. [Averchenko GA, Vasiliev KA, Rudakova EA, et al. Force regulation in beam-vaulted systems. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2021;7(4):5-13. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst2021745-13
  15. Thomas J. Kerr Fadeout and Reemergence of Civil Defense: From Shelters to Crisis Relocation. *Civil Defense in the U.S.* 2019. doi:10.4324/9780429049712-6

#### Сведения об авторах:

**Еникеев Артем Искандарович**, студент, Инженерно-строительный институт;

ORCID: 0000-0002-9366-8792; ResearcherID: GPX-8320-2022;

E-mail: enikeev.ai@edu.spbstu.ru

**Катикова Арина Сергеевна**, студент, Инженерно-строительный институт;

ORCID: 0000-0002-0091-1790; ResearcherID: GQR-0855-2022;

E-mail: arina.katikova@gmail.com

**Аверченко Глеб Александрович**, ассистент, Инженерно-строительный институт;

eLibrarySPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;

E-mail: averchenko\_ga@spbstu.ru

**Information about the authors:**

**Enikeev Artem Iskandarovich**, student, Institute of Civil Engineering;

ORCID: 0000-0002-9366-8792; Researcher ID: GPX-8320-2022;

E-mail: enikeev.ai@edu.spbstu.ru

**Katikova Arina Sergeevna**, student, Institute of Civil Engineering;

ORCID: 0000-0002-0091-1790; Researcher ID: GQR-0855-2022;

E-mail: arina.katikova@gmail.com

**Averchenko Gleb Aleksandrovich**, Assistant, Institute of Civil Engineering;

eLibrarySPIN: 1707-9958; ORCID: 0000-0001-8813-545X;

E-mail: averchenko\_ga@spbstu.ru

**Цитировать:**

Еникеев А.И., Катикова А.С., Аверченко Г.А. Методы натурного обследования убежищ гражданской обороны вокзальных комплексов города Москвы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 5–19. doi: 10.17816/transsyst2022835-19

**To cite this article:**

Enikeev AI, Katikova AS, Averchenko GA. Methods of full-scale survey of shelters of civil defense of railway complexes of the city of Moscow. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3): 5-19. doi: 10.17816/transsyst2022835-19

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.2

DOI 10.17816/transsyst20228320-30

© Л.М. Чеченова

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

## ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ

**Обоснование:** В настоящее время технологии бережливого производства активно внедряются в производственные процессы ОАО «РЖД». Грамотный подход к их совершенствованию существенно экономит время и сокращает эксплуатационные расходы за счет минимизации или исключения непроизводительных потерь. Это способствует удержанию лидирующих позиций на рынке транспортных услуг, сохранению доверия потребителей несмотря на меняющиеся условия и смещение географии перевозок.

**Цель:** оценка эффектов от реализации проекта бережливого производства по изменению технологического процесса доставки навесного оборудования до места проведения путевых работ. Мы подтверждаем, что предложенные решения позволяют повысить эффективность деятельности транспортной организации посредством применения инструментов бережливого производства.

**Методы:** методология исследования построена на анализе проектов и оценке эффектов от их внедрения в рамках реализации программы «Бережливое производство» в ОАО «РЖД» с использованием основных положений инструментального подхода и метода совокупной экономической эффективности. Информационная база исследования опирается на отчеты и нормативно-правовую базу ОАО «РЖД» и методики планирования и нормирования расходов при проведении путевых работ.

**Результаты:** обосновано изменение технологического процесса работ по доставке навесного оборудования до места проведения путевых работ, разработана дорожная карта по его совершенствованию, определены эффекты от реализации предложенного проекта, разработаны рекомендации по повышению эффективности деятельности транспортной организации посредством применения инструментов бережливого производства, установлены перспективы развития программы в ОАО «РЖД».

**Заключение:** исследование подтверждает, что одной из составляющих эффективного развития железнодорожной организации является разработка новых и совершенствования существующих решений по оптимизации процессов на базе активного использования методов и инструментов бережливого производства.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, бережливое производство, экономическая эффективность.

---

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© **L.M. Chechenova**

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

## AN APPROACH TO THE IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF LEAN PRODUCTION IN A TRANSPORT ORGANIZATION

**Background:** Currently, lean production technologies are being actively introduced into the production processes of JSC "Russian Railways". A competent approach to their improvement significantly saves time and reduces operating costs by minimizing or eliminating unproductive losses. This contributes to maintaining a leading position in the transport services market, maintaining consumer confidence despite changing conditions and shifting geography of transportation.

**Aim:** assessment of the effects of implementing a lean production project to change the technological process of delivering attachments to the site of track work. We confirm that the proposed solutions make it possible to increase the efficiency of the transport organization through the use of lean production tools.

**Methods:** the methodology of the study is based on the analysis of projects and assessment of the effects of their implementation within the framework of the implementation of the Lean production program in JSC "Russian Railways" using the main provisions of the instrumental approach and the method of cumulative economic efficiency. The information base of the study is based on reports and the regulatory framework of JSC "Russian Railways" and methods of planning and rationing expenses during travel work.

**Results:** the change in the technological process of work on the delivery of attachments to the place of track work is justified, a roadmap for its improvement is developed. the effects of the proposed project implementation are determined, recommendations for improving the efficiency of the transport organization through the use of lean production tools are developed, prospects for the development of the program in JSC "Russian Railways" are established.

**Conclusion:** the study confirms that one of the components of the effective development of a railway organization is the development of new and improvement of existing solutions for process optimization based on the active use of lean production methods and tools.

**Key words:** railway transport, lean production, economic efficiency.

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование производственных процессов существенно экономит время и сокращает эксплуатационные расходы за счет

минимизации или исключения непроизводительных потерь. К настоящему времени по результатам реализации программы «Бережливое производство» ОАО «РЖД» ежегодно наблюдается стабильная положительная динамика выполнения плана в ускоренном режиме. За период с 2020 по 2021 гг. подтвержденный эффект от внедрения экономичных производственных технологий составил более 3 млрд. руб. с выполнением плана на 140 %. По оценочным данным за 2022 г. несмотря на санкционные ограничения и смещение географии перевозок ожидается выполнение плана на 100-120 % от годового задания в целом [1, 2]. Подтверждением этому является эффективное внедрение проектов, опирающихся на предложения и решения работников линейных структурных подразделений ОАО «РЖД», рост которых за последние 6 лет достиг 20 тыс. ед. Слаженность работы всех звеньев технологической цепочки позволяет сократить излишние простои, отказы технических средств, улучшить качество и надежность производственных процессов, исключить излишнюю транспортировку. Предположительно совокупный эффект от реализации рационализаторских мероприятий ОАО «РЖД» к 2025 г. составит порядка 12 млрд. руб.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Новые ориентиры деятельности ОАО «РЖД» аккумулируют процессы поиска новых multifunctional решений и внедрения инновационных технологий бережливого производства (далее – БП). К положительным эффектам от реализации большинства проектов можно отнести реальное высвобождение имеющихся ресурсов, оптимизацию технологических процессов, повышение качества железнодорожных перевозок в целом наряду с экономией эксплуатационных расходов.

Объектом настоящего исследования является филиал ОАО «РЖД» – Северная железная дорога (далее по тексту – СЖД), на полигоне которого программа «Бережливое производство» реализуется с 2011 г. За период до 2019 г. внедрено более 3 тыс. проектов, направленных на улучшение технологических процессов, с повышением эффективности работ и снижением издержек на 860 млн. руб. По итогам 2021 г. СЖД заняла лидирующие позиции в корпоративном конкурсе проектов БП [3]. В планах на 2022 г. была предусмотрена реализация 84 проектов с общим экономическим эффектом в 130 млн. руб., большая часть из которых к настоящему времени результативно внедрена в производственные процессы. Укрупненная оценка крупнейших проектов БП, реализованных на полигоне СЖД, представлена в Табл. 1.

Таблица 1. Крупнейшие проекты БП, реализованные на полигоне СЖД

Характеристика проекта БП	Наименование участка	Сроки реализации	Экономический эффект
1. Сокращение времени следования транзитных поездов	«Лоста» – «Обозерская»	II кв. 2018 г.	5,5 млн. руб./год
2. Пересмотр графика работы маневровой техники	«Текстильный» – «Юрьев» – «Польский» – «Кольчугино»	Июль 2018 г.	7 млн. руб./год
3. Снижение трудоемкости процесса замены дефектных железобетонных шпал	Ст. «Ярославль – Главный»	Сентябрь 2019 г.	0,3 млн. руб./год
4. Предотвращение износа котельных	Ст. «Лоста»	III кв. 2019 г.	0,5 млн. руб./год

Источник: составлено автором

Однако в рамках деятельности СЖД можно выделить недостаточно целесообразную работу, связанную с доставкой навесного оборудования. Данный технологический процесс влечет за собой такие потери, как излишние транспортировка и перемещение, недостаточное использование человеческого потенциала и задержки. Целью данного исследования является оценка эффектов от реализации проекта БП по изменению технологического процесса доставки навесного оборудования до места проведения путевых работ и разработка рекомендаций по повышению эффективности деятельности СЖД посредством применения инструментов БП. Наша задача – оценить основные проекты БП, реализованные на полигоне СЖД, и проанализировать инструменты БП, внедряемые в производственную работу.

При оценке эффективности реализации проекта БП были использованы основные положения инструментального подхода и метода совокупной экономической эффективности, что позволило провести сравнительную оценку эффектов времени и затрат до и после реализации проекта. К основным инструментам БП, используемым на полигоне СЖД, можно отнести картирование, «Точно в срок», организация мест «5S», визуальный менеджмент, встроенное качество, всеобщее производительное обслуживание и стандартные операционные процедуры, что также отражено в нашем исследовании при разработке дорожной карты проекта и картировании текущего и целевого состояния процесса работ по доставке навесного оборудования до места проведения путевых работ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1. Обосновано изменение технологического процесса работ по доставке навесного оборудования

Особое внимание в проводимом исследовании уделяется анализу технологического процесса доставки навесного оборудования до места проведения путевых работ экскаватором модели kgt-4rs, целесообразность использования которого обеспечивается крепким механизмом, легким и безопасным обслуживанием, качеством проводимых ремонтных работ верхнего строения пути, земляного полотна, искусственных сооружений, инженерных коммуникаций и пр. [4]. Оптимизация технологического процесса работы экскаватора предполагает изготовление хозяйственным способом приспособления, устанавливаемого на стрелу экскаватора и позволяющего транспортировать две единицы навесного оборудования одновременно, что исключает количество непроизводительных перемещений и, как следствие, сокращает затраты времени (Рис. 1, 2).

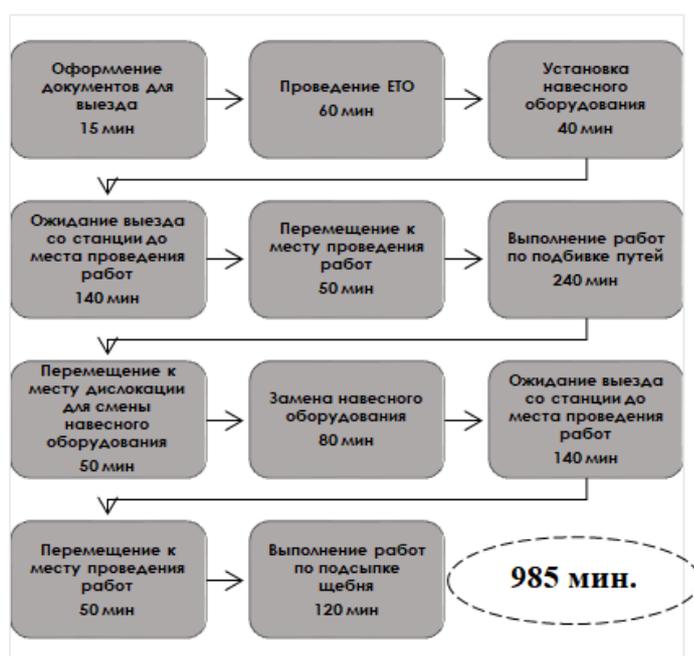


Рис. 1. Затраты времени до реализации проекта



Рис. 2. Затраты времени после реализации проекта

Источник: составлено автором

Таким образом, предложенные мероприятия позволяют сократить трудоемкость выполнения 1 заданной работы/операции на 4 часа.

## 2. Разработана дорожная карта по совершенствованию процесса доставки навесного оборудования до места проведения путевых работ

Эффективная реализация программы БП и необходимость наращивания объемов перевозимых грузов и пассажиров по сети железных дорог ставят перед путевым комплексом задачу совершенствования в том числе парка путевой техники. То есть стоит задача наращивания объемов работ по ремонту и обслуживанию пути с использованием многофункциональных машин, позволяющих сократить количество единиц техники, работающих в «окно», и вывести из эксплуатации малопроизводительные устаревшие модели. При разработке дорожной карты в значительной степени мы опирались именно на указанную логику, поскольку предлагаемая модель позволяет значительно повысить производительность ремонтных и текущих путевых работ (Рис. 3).

	Мероприятие	Срок	Ответственные лица
Подготовительные мероприятия для реализации проекта	Разработка предложений по внедрению экскаватора модели kgt-4rs в технологический процесс	1 месяц	Главный инженер, технический отдел, отдел финансов
	Оформление необходимых документов	5 дней	Юридический отдел, главный инженер, технический отдел
	Согласование реализации проекта по внедрению экскаватора модели kgt-4rs в технологический процесс	1 день	Технический отдел, отдел финансов
Процесс реализации проекта	Проведение ЕТО	1 день	Главный инженер, технический отдел
	Установка навесного оборудования	2 дня	Бригадир пути, слесарь по ремонту
	Выполнение работ по подбивке путей	2 дня	Бригадир пути, слесарь по ремонту, путевые обходчики
	Замена навесного оборудования	1 день	Бригадир пути, слесарь по ремонту
	Выполнение работ по подсыпке щебня	1 день	Слесарь по ремонту

Рис. 3. Дорожная карта реализации проекта бережливого производства

Источник: составлено автором по данным [5]

### 3. Определены эффекты от реализации проекта бережливого производства

В перечень учитываемых расходов входят элементы затрат в расчете на 1 заданную работу/ операцию (Табл. 2).

Таблица 2. Группировка затрат до и после реализации проекта бережливого производства

Элементы затрат	Сумма затрат <u>до</u> реализации проекта	Сумма затрат <u>после</u> реализации проекта
1. Оплата труда, руб.	5107,3	3799,32
2. Отчисления на социальные нужды, руб.	1552,6	1154,99
3. Топливо, руб.	7234,19	5967,21
<b>Итого, руб.</b>	<b>13894,1</b>	<b>10921,52</b>

Источник: составлено автором

Детализация по видам расходов на оплату труда машиниста ЖДСМ 7 разряда до реализации проекта представлена в Табл. 3.

Таблица 3. Детализация расходов на оплату труда

Детализация затрат	Сумма, руб.
Затраты на оплату труда в час, в т.ч.	311,42
– тариф	131,4
– премия	144,5
– зональная надбавка	35,5
<b>Итого затрат за 16,4 ч.</b>	<b>5 107,3</b>

Источник: составлено автором по данным [6]

Затраты на расход топлива учитывают стоимость 1 кг топлива – 44,3 руб. и объем расходуемого топлива для проведения путевых работ – 14,2 кг/час [7]. Перемещение экскаватором kgt-4rs одновременно двух единиц оборудования обеспечит сокращение затрат времени с 16,4 до 12,2 часов и снижение расхода топлива с 163,3 кг до 134,7 кг в расчете на 1 заданную работу/операцию. Таким образом, совокупный экономический эффект составит 2972,58 руб. в расчете на 1 заданную работу/операцию.

#### 4. Предложены мероприятия по повышению эффективности деятельности посредством применения инструментов бережливого производства

Проанализировав объемы путевых работ за период с 2019-2021 гг., проводимых на полигоне СЖД, рекомендуется оснащение 3 экскаваторов предлагаемым механизмом, каждый из которых будет выполнять по 180 операций в год при необходимом объеме в 540 операций.

В целях повышения эффективности деятельности Северной железной дороги в рамках проводимого исследования рекомендованы мероприятия, позволяющие достичь положительных результатов посредством применения инструментов бережливого производства, в частности замены навесного оборудования (Рис. 4).

Рекомендации	Способы реализации	Ожидаемый эффект
1. Сокращение задержек при ожидании выезда со станции до места проведения работ	Включение предиктивных операций (оформление документов для выезда, проведение ЕТО, установка навесного оборудования) в состав времени ожидания выезда	Сокращение времени ожидания выезда на дислокацию на 30-40 мин.
2. Учет показателей, подтверждающих эффективность реализации проекта	Учет большего количества показателей, показывающих не только прямую эффективность, но и опосредованную (напр., рост производительности труда)	Экономия денежных средств в размере 2 972,58 руб. от одной операции
3. Ведение документооборота при реализации проекта в электронном виде	Передача документов по электронной почте, электронные подписи, внедрение ЭДО [8,9]	Сокращение затрат времени примерно на 30-40 мин./ день

Рис. 4. Рекомендации по повышению эффективности деятельности СЖД посредством применения инструментов бережливого производства

Источник: составлено автором

#### 5. Установлены перспективы развития программы «Бережливое производство» в ОАО «РЖД»

Перспективы развития программы «Бережливое производство» в структурных подразделениях ОАО «РЖД» с учетом направлений, представленных на Рис. 5.

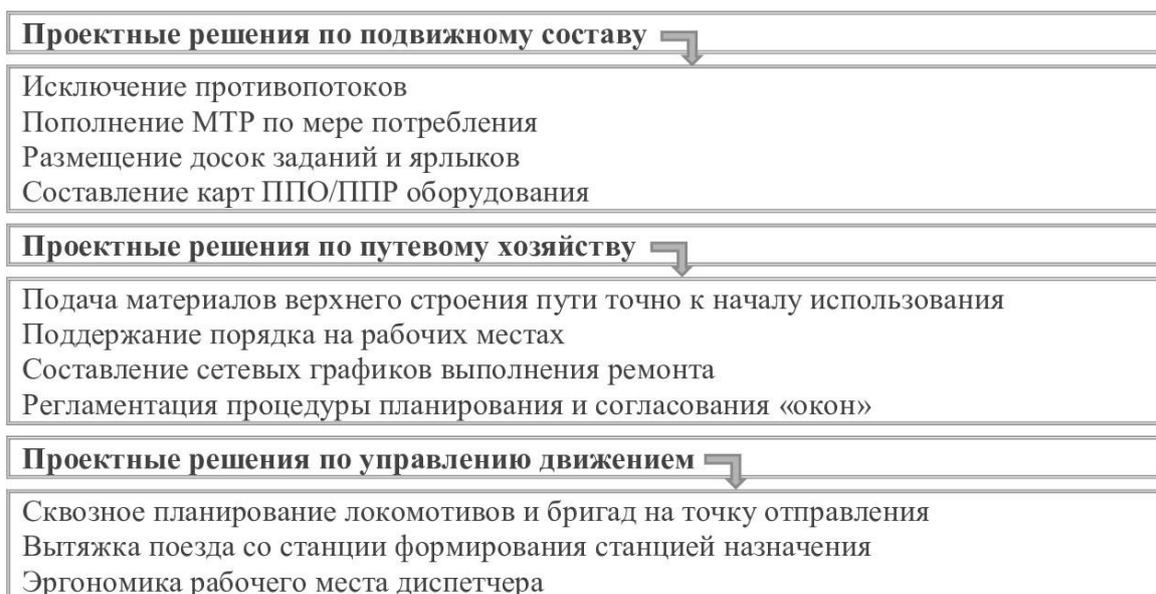


Рис. 5. Перспективы программы «Бережливое производство» в ОАО «РЖД»

Источник: составлено автором

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях рационального использования ресурсов железнодорожной отрасли применение инструментов бережливого производства является одним из ключевых направлений повышения эффективности работы ОАО «РЖД». Изученный опыт работы путевых машин ведущих организаций, таких как «Плассер и Тойрер» (Австрия), «Спено», «Матиза» (Швейцария) и пр., а также анализ отечественного путевого машиностроения (АО «192 ЦЗЖТ», АО «ПО «Бежицкая сталь», Тверской ВСЗ и пр.) убеждает нас в необходимости дальнейших перспектив в части создания высокопроизводительных машин и multifunctional технологий путевых работ, соответствующих новым условиям эксплуатации железных дорог.

Несомненно, «бережливые» решения в части ремонта и содержания пути с применением машинных комплексов нового поколения зависят от уровня технического перевооружения предприятий-производителей, скорости разработки и внедрения технических регламентов и систем сертификации, качества разработанных наукоемких технологий в создаваемых путевых машинах, изучения и взятия на вооружение передового зарубежного опыта и пр. Таким образом, активизация разработки практических инструментов бережливого производства, более производительное использование скрытых резервов и снижение затрат обеспечивает устойчивость деятельности ОАО «РЖД», что подтверждено не только отечественным, но и мировым опытом.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Мониторинг ЦНТИБ – филиала ОАО «РЖД» «Бережливое производство». [Monitoring CNTIB – filiala ОАО “RZHD” “Berezhlivoe proizvodstvo”. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: [https://lib.rgups.ru/site/assets/files/1107/berezhlivoe\\_proizvodstvo\\_6\\_2022.pdf](https://lib.rgups.ru/site/assets/files/1107/berezhlivoe_proizvodstvo_6_2022.pdf)
2. Альманах «Управление производством». [Al'manah “Upravlenie proizvodstvom”. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://up-pro.ru/store/upravlenie-proizvodstvom/>
3. Гудок. Выпуск № 12 (27348) 26.01.2022. [Gudok. Vypusk № 12 (27348) 26.01.2022. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1593167&archive=2022.01.26>
4. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию модели экскаватора-погрузчика на комбинированном ходу kgt-4rs. [Rukovodstvo po ekspluatácii i tehničeskomu obsluživaniju modeli ekskavatora-pogruzchika na kombinirovannom hodu kgt-4rs. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://enerteh.net/wp-content/uploads/2018/08/kgt-4rs.pdf>
5. Положение о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД», утверждённое распоряжением ОАО «РЖД» № 2036р от 09.09.2011, редакция от 04.10.2011. [Polozhenie o sisteme nerazrushayushchego kontrolya rel'sov i ekspluatácii sredstv rel'sovoj defektoskopii v putevom hozyajstve zheleznyh dorog ОАО «RZHD», utverzhdyonnoe rasporyazheniem ОАО “RZHD” № 2036r ot 09.09.2011, redakciya ot 04.10.2011. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://www.tdesant.ru/info/item/62>
6. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (утв. решением правления ОАО «РЖД» (протокол от 18-19 декабря 2006 г. N 40) (ред. от 22.05.2015). [Polozhenie o korporativnoj sisteme oplaty truda rabotnikov filialov i strukturnyh podrazdelenij otkrytogo akcionernogo obshchestva «Rossijskie zheleznye dorogi» (utv. resheniem pravleniya ОАО “RZHD” (protokol ot 18-19 dekabrya 2006 g. N 40) (red. ot 22.05.2015). [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://jd-doc.ru/2007/yanvar-2007/13125-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-31-01-2007-n-135r>
7. Методика планирования и нормирования расхода топлива для специального подвижного состава в ОАО «РЖД», утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 декабря 2007 г. № 2464р. [Metodika planirovaniya i normirovaniya raskhoda topliva dlya special'nogo podvizhnogo sostava v ОАО “RZHD”, utv. Rasporyazheniem ОАО «RZHD» ot 28 dekabrya 2007 g. № 2464r. [Internet]. (In Russ.)]. Ссылка активна на 21.07.2022. Доступно по: <https://jd-doc.ru/2007/dekabr-2007/12946-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-28-12-2007-n-2464r>
8. Гулый И.М. Экономическая оценка тенденций цифровой трансформации российского железнодорожного транспорта // Транспортное дело России. – 2021. – № 3. – С. 37–39. [Gulyj IM. Ekonomicheskaya ocenka tendencij cifrovoj transformacii rossijskogo zheleznodorozhnogo transporta. Transportnoe delo Rossii. 2021;2:37-39. (In Russ.)]. doi: 10.52375/20728689\_2021\_3\_37

9. Гулый И.М. Оценка цифровой трансформации российского железнодорожного транспорта // Экономические науки. – 2021. – № 3. – С. 97–100. [Gulyj IM. Ocenka cifrovoj transformacii rossijskogo zheleznodorozhnogo transporta. Ekonomicheskie nauki. 2021;2:97-100. (In Russ.)]. doi: 10.14451/1.203.97

**Сведения об авторе:**

**Чеченова Лиана Мухамедовна**, к.э.н;

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. Внедрение технологического решения и оценка результативности бережливого производства при проведении путевых работ // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 20–30. doi: 10.17816/transsyst20228320-30

**To cite this article:**

Chechenova LM. Implementation of a technological solution and evaluation of the effectiveness of lean manufacturing during track work. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):20-30. doi: 10.17816/transsyst20228320-30

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.2

DOI 10.17816/transsyst20228331-44

© Я.И. Никонова<sup>1</sup>, Е.А. Проскурякова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения  
(Новосибирск, Россия)

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения  
Александра I  
(Санкт-Петербург, Россия)

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОКЗАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

**Обоснование:** Цифровая железная дорога – важнейший мировой тренд развития железнодорожного транспорта. «Умный вокзал» является частью концепции цифровой железной дороги. В настоящее время не существует однозначного решения задачи, каким образом внедрить передовые информационные технологии повышения эффективности и уровня обслуживания железнодорожной транспортной системы в вокзальные комплексы. Строительство новых и реконструкция существующих вокзальных комплексов в соответствии с концепцией «умный вокзал» является актуальным и для российских железных дорог.

**Цель:** выявить приоритетные направления развития вокзальных комплексов; дать характеристику основных мероприятий по цифровизации системы управления вокзалами ОАО «РЖД».

**Материалы и методы:** в процессе проведения исследования использовались системный подход, анализ, синтез, методы и инструменты статистической обработки данных: табличный метод, методы расчета средних и относительных величин, методы анализа динамики. Мероприятия по цифровизации систем управления вокзалами оценивались на основе методов оценки эффективности инвестиционных проектов в сфере железнодорожного транспорта. Информационную базу составляют труды отечественных и зарубежных ученых в области цифровизации железных дорог, развития вокзальных комплексов, а также стратегические документы ОАО «РЖД»: Долгосрочная программа развития железнодорожных вокзалов Дирекции железнодорожных вокзалов – филиала ОАО «РЖД» на период до 2025 года; Концепция эффективного использования и развития железнодорожных вокзалов на период до 2030 года; Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года; Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года.

**Результаты:** рассмотрены мировые тенденции развития вокзальных комплексов; уточнена сущность категории «умный вокзал»; дана характеристика основных направлений цифровизации вокзальных комплексов ОАО «РЖД».

**Заключение:** концепция «умный вокзал» является основой реализуемых в современных условиях изменений в организации деятельности вокзальных комплексов. Внедрение цифровизации способствует повышению эффективности всех видов деятельности вокзальных комплексов ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** железнодорожный вокзал, вокзальные комплексы, «умный вокзал», Российские железные дороги, цифровизация.

## Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© Y.I. Nikonova<sup>1</sup>, E.A. Proskuryakova<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian Transport University  
(Novosibirsk, Russia)<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
(St. Petersburg, Russia)**DIGITALIZATION OF RAILWAY STATION COMPLEXES**

**Background:** Digital railway is the most important global trend in the development of railway transport. “Smart station” is part of the digital railway concept. Currently, there is no unambiguous solution to the problem of how to introduce advanced information technologies to improve the efficiency and level of service of the railway transport system in the station complexes. The construction of new and reconstruction of existing station complexes in accordance with the concept of “smart station” is also relevant for Russian railways.

**Aim:** identify priority areas for the development of station complexes; to characterize the main measures for the digitalization of the management system of railway stations of Russian Railways.

**Materials and Methods:** in the course of the study, a systematic approach, analysis, synthesis, methods and tools for statistical data processing were used: tabular method, methods for calculating average and relative values, methods for analyzing dynamics. Activities for the digitalization of station management systems were evaluated on the basis of methods for evaluating the effectiveness of investment projects in the field of railway transport. The information base consists of the works of domestic and foreign scientists in the field of digitalization of railways, the development of railway stations, as well as strategic documents of Russian Railways: Long-term program for the development of railway stations of the Directorate of Railway Stations – a branch of Russian Railways for the period up to 2025; The concept of efficient use and development of railway stations for the period up to 2030; Development strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2030; Long-term development program of Russian Railways until 2025.

**Results:** the world trends in the development of station complexes are considered; clarified the essence of the category “smart station”; the characteristics of the main directions of digitalization of the station complexes of Russian Railways are given.

**Conclusion:** the concept of “smart station” is the basis for changes in the organization of the activities of station complexes being implemented in modern conditions. The introduction of digitalization contributes to an increase in the efficiency of all types of activities of the station complexes of Russian Railways.

**Key words:** railway station, station complexes, “smart station”, Russian Railways, digitalization.

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие вокзальных комплексов требует интеграции множества различных целей. Важнейшими проблемами являются формирование общего системного понимания среди множества заинтересованных сторон

с потенциально конфликтующими интересами и структурированное определение комплексных критериев оценки. Современная деятельность крупнейших зарубежных управляющих вокзалами характеризуется следующими приоритетами.

1. Переход от управления вокзалами к управлению транспортно-пересадочными узлами, от мультимодальности к мультимобильности. В современных условиях модель мультимодального транспортно-пересадочного узла не является больше «моделью будущего», это норма развития вокзалов. Задача управляющего вокзалом, в связи с этим, – обеспечить технологический и управленческий баланс во взаимодействии с операторами не только железнодорожного, но и других видов транспорта [1]. С 2015 года в практике управляющих вокзалами стал использоваться термин «мультимобильность», т.е. бесперебойная работа и развитие мультимодальных систем [2].

Актуальной тенденцией реализации проектов развития вокзалов или транспортно-пересадочных узлов становится применение принципов транзитно-ориентированного формирования территорий, прежде всего городских. Такие проекты включают максимально возможную прилегающую территорию, увязку различных видов транспорта и транспортных услуг; согласуются с приоритетами регионального и/или городского развития [3–5].

Первыми работу в данном направлении начали японские компании (группы JR, а также архитектурные компании, например, Nikken Sekkei). Такой подход применяется европейскими компаниями при реализации проектов greenfield («с нуля») в странах Ближнего Востока. Постепенно возрастает интерес компаний к реализации подобных проектов не только на пустых или вновь осваиваемых территориях, но и при проведении работ по масштабной реконструкции вокзалов. Примерами этому могут служить проекты французской компании AREP, группа SNCF, концепция «city booster» – «городской катализатор»); Network Rail (Великобритания) совместно с партнёрскими архитектурными бюро. Такой подход приводит к увеличению времени и стоимости реализации проектов при одновременном повышении эффективности за счёт синергетического эффекта. В целом о необходимости поиска новых управленческих моделей и решений говорят представители и других железнодорожных администраций, в т.ч. Deutsche Bahn, FSI, NS, SBB, Adif, Korail.

2. Диджитализация (цифровизация) – одна из основ актуального технологического и инновационного развития вокзалов. Нарращивание использования информационных технологий в управлении вокзалами указано в стратегических документах практически всех крупных управляющих вокзалами [6].

Цифровизация вносит вклад в повышение эффективности и сбалансированности работы вокзалов на всех стадиях жизненного цикла вокзала: применение BIM-технологий и имитационного моделирования пассажиропотоков [8, 9] становятся обязательными элементами для планирования деятельности вокзалов и принятия управленческих решений.

«Цифровой прорыв» (Digital Shift), в свою очередь, определяет тенденции персонализации и актуализации услуг. Первое достигается путём использования технологии аналитики BigData для формирования индивидуальных предложений в рамках спектра услуг конкретного вокзала или группы вокзалов, а второе – предложение современных цифровых услуг (электронная торговля, цифровые помощники и др.) [7].

Цифровизация определяет тенденции изменения технологических процессов. Ярким примером является подход к информированию клиентов на вокзалах Голландии, Германии и Франции: по общим каналам (аудио- и видео) выдаётся минимальный набор информации об изменениях в расписании прибытий и отправлений, а также о конкретных маршрутах перевозок, более подробную, индивидуальную информацию клиент может запросить в мобильном приложении. В практике европейских управляющих вокзалами всё больше внимания уделяется таким персонифицированным услугам при постепенном отказе от «массовых» услуг.

3. Высокая социальная, экологическая ответственность и значимая роль в культурной среде городов в целом. Доступность вокзалов в широком смысле: безбарьерная среда для всех маломобильных групп, информационная доступность для разных категорий пользователей, доступность связи с сотрудниками/руководством становится необходимым требованием, предъявляемым к современным вокзальным комплексам. Имеются тенденции к трансформации социально-культурных мероприятий на вокзалах из разовой практики, направленной на стимулирование спроса, к одному из постоянных направлений деятельности управляющим вокзалами. Подобные постоянные программы, например, действуют во Франции (программа «вокзал – центр культуры города») и в Испании (при поддержке Федерации железных дорог Испании), а также в Японии [10].

В части экологической ответственности наблюдается тенденция к более активному применению экологически ответственных подходов на стадии планирования деятельности вокзала и проектирования (при реконструкции). Лидерами в данном направлении являются японские и немецкие компании (проект SUSSTATION).

Эти мировые тенденции находят свое отражение и в развитии деятельности российских железнодорожных вокзалов.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ВОКЗАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ОАО «РЖД»

Большинство крупных управляющих вокзалами определяют актуальную концепцию современного вокзала как «умный вокзал» («smart station»), или «сбалансированный вокзал» («sustainable station») [11].

Категория «устойчивого вокзала» в современном понимании имеет тенденцию к расширению и включает в себя экономическую и социальную устойчивость на протяжении всего жизненного цикла [12], а также вопросы безопасности, к которым предьявляется повышенное внимание на всех стадиях жизненного цикла вокзала.

«Умный вокзал» удовлетворяет следующим критериям:

- высокий уровень автоматизации и диспетчеризации, а также применения современных технологий, высокий уровень технологической надёжности;
- высокий уровень клиентоориентированности и персонализации услуг;
- высокий уровень диджитализации;
- удобное расположение услуг для клиентов (пассажиров и посетителей) и взаимная увязка с другими видами транспорта и транспортных услуг;
- баланс затрат и результатов, экономическая эффективность;
- качественное построение управленческого процесса [13].

Дополнительно стоит отметить, что ограниченная емкость железнодорожного рынка и существенный вклад управленческих ресурсов в развитие услуг пассажирам и посетителям определяет тенденцию к увеличению доли доходов от неоперационной деятельности и, соответственно, уменьшению доли доходов от услуг операторам, в структуре доходов управляющих вокзалами [14].

Централизованное управление вокзальными комплексами ОАО «РЖД» осуществляет Дирекция железнодорожных вокзалов – филиал ОАО «РЖД» (далее – Дирекция). Дирекция является специализированным подразделением (со специализацией только на вопросах управления вокзальными комплексами) в составе бизнес-блока «пассажирские перевозки» холдинга «РЖД»

В настоящее время Дирекция объединяет 341 вокзальный комплекс в составе 15 региональных дирекций. Пассажиропоток по вокзалам Дирекции составляет порядка 91 % от общего пассажиропотока по сети ОАО «РЖД» в дальнем сообщении и около 23 % в пригородном сообщении.

С точки зрения инновационного развития и информатизации (диджитализации) вокзалы Дирекции характеризуются:

- низким уровнем автоматизации и диспетчеризации процессов;
- высоким уровнем влияния субъективного (человеческого) фактора, в том числе в рамках предоставления обязательных услуг (перевозочного процесса);
- практически полным отсутствием современных цифровых услуг, актуальных для пользователей.

С 2015 года Дирекцией железнодорожных вокзалов активно проводится работа по цифровизации вокзальных комплексов по следующим блокам: оптимизация работы инженерных систем и контроля качества; обеспечение безопасности; развитие современных цифровых услуг; повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности. Дадим характеристику каждому из этих направлений.

### **ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА**

В рамках блока «Оптимизация работы инженерных систем и контроля качества» Дирекцией железнодорожных вокзалов осуществляется внедрение следующих систем: автоматизированная система диспетчеризации контроля и управления (АСДКУ); централизованная система информирования пассажиров (ЦСИП); информационно-оповестительное оборудование; системы контроля качества аутсорсинговых компаний по клинингу, техническому обслуживанию и текущему ремонту оборудования.

Основной задачей системы диспетчеризации контроля и управления является создание «умного вокзала». АСДКУ предусматривает управление и диспетчеризацию следующих подсистем инженерного оборудования: вентиляция и кондиционирование, теплоснабжение, водоснабжение, канализация, мониторинг электроснабжения, оборудование вертикального транспорта, система SMS-оповещения обслуживающего персонала, система контроля доступа, система охранно-пожарной сигнализации, система видеонаблюдения, система контроля параметров (наличие питания, давление, датчики вредных веществ и т.д.), система самодиагностики и отчетов, управление освещением и другие инженерные системы вокзалов.

ЦСИП призвана обеспечить централизованное удалённое управление системами информирования пассажиров, взаимодействие с автоматизированными системами управления движением и нормативными базами ОАО «РЖД», а также удалённый мониторинг работоспособности информационно-справочных систем. Фактическое внедрение ЦСИП начато в 2017 г.

Функциональные возможности системы:

- ввод текстовой и аудио информации о расписании движения поездов;
- отображение импортированной и введенной информации на информационных носителях (табло);
- воспроизведение аудиосообщений (громкоговорящее оповещение);
- мониторинг работоспособности аппаратных средств информационно-справочных систем.

Первоначальным экономическим эффектом от реализации проекта является снижение затрат на приобретение и сопровождение программного обеспечения. При расширении зоны внедрения системы предполагается снижение расходов на эксплуатацию информационно-оповестительного оборудования (за счет исключения «закрытого» программного обеспечения, привязанного к конкретным вендорам и разработчикам), а также снижение затрат на оплату труда.

Технологические эффекты:

- повышение точности и достоверности предоставляемой пассажирам информации;
- формирование среды для беспрепятственного пользования вокзалами людьми с ограниченными возможностями по зрению;
- снижение влияние человеческого фактора и повышение качества обслуживания пассажиров в целом;
- возможность поэтапного ввода в эксплуатацию отдельных участков и направлений пассажирских перевозок;
- интеграция с системами автоматизации движения ОАО «РЖД» и системами автоматизации железнодорожного транспорта;
- мониторинг и диагностика исправности оборудования;
- сокращение издержек на содержание и эксплуатацию существующей системы информирования пассажиров;
- тиражирование системы на все вокзалы Дирекции;
- отсутствие зависимости от наличия систем резервирования данных в рамках вокзала.

Внедрение информационно-оповестительного оборудования. Дирекцией проработан новый тип энергоэффективных табло, создан презентационный стенд, таким образом, проект готов к реализации. Энергопотребление предлагаемых табло, сделанных по новой технологии, в 45 раз ниже используемых.

Основной задачей системы контроля качества аутсорсинговых компаний по клинингу, техническому обслуживанию и текущему ремонту оборудования является контроль качества выполнения работ подрядными организациями на вокзалах, данная система должна охватить весь спектр

подрядных работ, от клининга до эксплуатации, ее основной функционал:

- возможность формирования заданий для выполнения работ (периодических, постоянных, экстренных) подрядными организациями;
- визуальный контроль выполнения работ из любого места;
- оценка качества;
- сбор статистики;
- учет штрафов подрядным организациями.

В 2017 году система пилотно внедрена на Ленинградском вокзале. В результате: в 2 раза увеличилась скорость выполнения заданий; в 3 раза увеличилось число выполненных заданий.

*Таблица 1. Основные мероприятия по цифровизации системы управления вокзалами в рамках блока «Оптимизация работы инженерных систем и систем обеспечения безопасности»*

Мероприятия	2022		2025	
	к.с.	б.с.	к.с.	б.с.
1. Выполнение проектно-изыскательских и строительного-монтажных работ по проектам внедрения Интегрированной комплексной системы контроля технологических процессов (ИКСКТП) и Автоматизированной системы диспетчеризации контроля и управления (АСДКУ)				
– требуемый объем инвестиционного бюджета, млн. руб., без учета НДС	200	855	20	170,6
– количество вокзалов	8	37	1	7
2. Эксплуатационно-техническое обслуживание и технический ремонт интегрированной комплексной системы контроля технологических процессов (ИКСКТП) и Автоматизированной системы диспетчеризации контроля и управления (АСДКУ)				
– требуемый объем эксплуатационного бюджета, млн. руб., без учета НДС	62,56	54,74	67,16	59,34
– количество вокзалов	136	119	146	129
3. Выполнение работ по модернизации системы статической и динамической навигации с внедрением Централизованной Системы информирования пассажиров (ЦСИП) с определением очередности				
– требуемый объем инвестиционного бюджета, млн. руб., без учета НДС	900	1003,7	100	0
– количество вокзалов	31	50	3	0
4. Внедрение и эксплуатация системы контроля качества аутсорсинговых компаний по клинингу, техническому обслуживанию и текущему ремонту оборудования на вокзалах Дирекции				
– требуемый объем эксплуатационного бюджета, млн. руб., без учета НДС	9	9	9	9
– количество вокзалов	347	347	347	347

Характеристика основных мероприятий по цифровизации системы управления вокзалами ОАО «РЖД» до 2025 года в рамках блока «Оптимизация работы инженерных систем и систем обеспечения безопасности» по консервативному (к.с.) и базовому (б.с.) сценариям представлена в Табл. 1.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В рамках блока «Обеспечение безопасности» Дирекцией железнодорожных вокзалов осуществляется внедрение интегрированной комплексной системы контроля технологических процессов (ИКСТП). Проект направлен на объединение в единую информационную систему всех систем безопасности и инженерных систем вокзального комплекса, что позволяет усилить контроль за обеспечением транспортной безопасности, за работой всех автоматизированных систем (подключенных к ИКСТП) и работой сотрудников на ответственных постах.

Система обеспечивает многоуровневый контроль работы сотрудников, отвечающих за транспортную безопасность. Подключение новых вокзалов, постановка на контроль оборудования инженерных систем, обеспечение комплексной безопасности вокзала, контроль за жизнедеятельностью. При этом необходима корректировка ранее выполненных проектов, а также глобальная замена (в рамках системы) программного обеспечения мониторинга работы оборудования в виду несовершенства существующего.

## РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ УСЛУГ

В рамках блока «Развитие современных цифровых услуг» в соответствии с «Концепцией эффективного использования и развития железнодорожных вокзалов на период до 2030 года» Дирекцией железнодорожных вокзалов осуществляется внедрение следующих услуг:

1) Предоставление беспроводного доступа в сеть Интернет (Wi-Fi на вокзалах). «РЖД» совместно с компанией «ТрансТелеКом» реализует проект по предоставлению бесплатного выхода в Интернет на железнодорожных вокзалах с 2015 года. Сейчас Wi-Fi-доступ работает на всех крупнейших вокзальных комплексах России. Согласно итогам опросов клиентов, услуга доступа в Интернет является одной из наиболее востребованных на вокзалах.

2) Установка станций зарядки мобильных устройств. Основной задачей для терминалов зарядки мобильных устройств является предоставление пассажирам бесплатной услуги по зарядке своих мобильных устройств в период пребывания на вокзальном комплексе.

Терминалы также являются частью общей информационно-справочной системы вокзала, и позволяют в процессе получения услуги по зарядке мобильного устройства получить информацию о вокзале, расписании движения поездов и предоставляемых услугах.

Функциональные характеристики терминалов:

- до 16 ячеек для зарядки мобильных устройств;
- предоставление справочной информации о вокзале.

3) Внедрение мобильной навигации на базе технологии iBeacon. В предлагаемом решении используется технология навигации внутри вокзала с использованием радиомаяков стандарта BLE (Bluetooth Low Energy) - iBeacon. Единое клиентское мобильное приложение (ЕКМП), на смартфоне пользователя, получив сигналы, идентифицирует их, по уровню сигнала определяет расстояния до маяков и вычисляет свое местоположение. ЕКМП устанавливается на смартфоны посетителей и через свой интерфейс предоставляет пользователям доступ ко всем информационным и навигационным сервисам, реализованным в системе.

Технологические эффекты:

- возможность осуществлять навигацию на территории вокзала с указанием места оказания тех или иных услуг;
- возможность осуществлять доступ к информационным и навигационным сервисам вокзала с помощью приложения на мобильном устройстве;
- повышение точности и достоверности предоставляемой пассажирам информации;
- формирование среды для беспрепятственного пользования вокзалами людьми с ограниченными возможностями по зрению;

4) Внедрение системы управления электронной очереди (СУО). Внедрение электронной системы управления очередью (СУО) является важной задачей повышения качества оказания услуги на вокзалах. Упорядочивание очередности подхода к кассам, организация зон ожидания и исключения живых очередей у касс снижает социальное напряжение, исключает появление конфликтных ситуаций между пассажирами и кассирами. Повышает качество работы самих кассиров.

Функциональные характеристики системы:

- организация очередности подхода к кассам;
- гибкое перераспределение нагрузок на кассиров;
- организация приоритизации обслуживания по услугам и группам.

Проект обеспечивает значительное улучшение качества оказания услуг. Упорядочивание очередности подхода к кассам, организация зон ожидания и исключения живых очередей у касс, исключает появление конфликтных ситуаций между пассажирами и кассирами.

Характеристика основных мероприятий по цифровизации системы

управления вокзалами ОАО «РЖД» до 2025 года в рамках блока «Развитие современных цифровых услуг» по консервативному (к.с.) и базовому (б.с.) сценариям представлена в Табл. 2.

Таблица 2. Основные мероприятия по цифровизации системы управления вокзалами в рамках блока «Развитие современных цифровых услуг»

Мероприятия	2022		2025	
	к.с.	б.с.	к.с.	б.с.
1. Предоставление беспроводного доступа в сеть Интернет (Wi-Fi на вокзалах) за счет аренды оборудования и покупки услуг у оператора связи				
– требуемый объем эксплуатационного бюджета, млн. руб., без учета НДС	37,43	58	45,31	58
– количество вокзалов	190	347	230	347
2. Поставка и установка станций зарядки мобильных устройств на вокзальные комплексы Дирекции				
– требуемый объем инвестиционного бюджета, млн. руб., без учета НДС	50	50	0	0
– количество вокзалов	25	50	0	0
3. Внедрение мобильной навигации на базе технологии iBeacon, исходя из классности и среднегодового пассажиропотока				
– требуемый объем инвестиционного бюджета, млн. руб., без учета НДС	165,3	105,3	45	0
– количество вокзалов	33	21	9	0
4. Внедрение системы управления электронной очередью на внеклассных вокзальных комплексах и вокзальных комплексах 1 класса исходя из среднегодового пассажиропотока				
– требуемый объем инвестиционного бюджета, млн. руб., без учета НДС	45	0	5,6	0
– количество вокзалов	28	0	3	0

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В рамках блока «Повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности» Дирекцией железнодорожных вокзалов осуществляется программа энергосбережения и обеспечение экологической безопасности

За 5 лет программы энергосбережения обеспечено выполнение установленных планов организационно-технических мероприятий по достижению целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности по всем структурным подразделениям Дирекции. В среднем общий план организационно-технических

мероприятий по достижению целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности составляет 42 179,518 ГДж, а фактическая экономия равна 52 579,180 ГДж.

Обеспечение экологической безопасности. В целях соблюдения норматива предельно допустимых концентраций, разрешенных к сбросу в централизованную систему водоотведения предусмотрена установка локальных очистных сооружений на вокзалах.

По данным на 2020 год к ИТ-системе удалённого управления подключено 234 вокзала ОАО «РЖД». Автоматизированная система удаленного управления организует единое информационное пространство всех жизнеобеспечивающих функций вокзала: видеонаблюдения и дистанционной связи с пассажиром, громкоговорящего оповещения, контроля входных групп, температурного режима, освещения, пожарной и охранной автоматики, а также возможности дистанционной корректировки информационного табло с расписанием движения поездов. Планируется, что подобные системы будут установлены еще более чем на 200 малых вокзалах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях происходит коренное изменение подхода к организации деятельности вокзальных комплексов. Главная задача при этом – обеспечить не только безопасное, но и комфортное пребывание людей на вокзале. Решением данной задачи стал проект «умный вокзал» – комплекс систем, в первую очередь инженерных, позволяющих максимально увеличить эффективность функционирования инфраструктуры и технических средств вокзала, при котором все технические, технологические и организационные процессы реализуются при минимальном участии человека.

Концепция «умный вокзал» сочетает экономическую, социальную, ресурсную, технологическую эффективности, включая уровень цифровизации; общий комфорт (пребывания, работы) и доступность (клиентам, сотрудникам); эффективность взаимодействия с прилегающей городской средой и её элементами; непрерывную цепочку формирования добавочной стоимости, в том числе в части увеличения человеческого капитала и роста комфорта, без ущерба для всех функционалов вокзала [15].

Данная модель в общем виде воспринимается как непереносимое условие обеспечения эффективности всех видов деятельности каждого вокзального комплекса.

В последние годы в направлении инновационного развития и информатизации в Дирекции совершён качественный скачок. Началось единовременное внедрение новых и актуальных технологий сразу по

нескольким направлениям, связанным как с поддержанием технического состояния и контролем, так и с прямыми услугами пользователей вокзалов.

Недостаток финансирования – ключевой ограничивающий фактор, который частично может быть нивелирован включением современных решений уже на стадии проектирования при проведении реконструкции, а также совмещением с иными проектами уровня холдинга «РЖД».

Дальнейшая цифровизация всей системы управления вокзалами, включая технические системы, систему управления имуществом, а также систему услуг клиентам определена в качестве одной из ключевых задач развития Дирекции до 2025 года, включая тиражирование прошедших пилотную стадию и запущенных в реализацию проектов.

#### 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. Zhuravleva NA, Poliak M. Architecture of managing big data of mixed transportation of passengers in agglomerations. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 918, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia, 2020. 22-27 May 2020, Novosibirsk, Russia; 2020. doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012055
2. Zemp S, Stauffacher M, Lang DJ, Scholz RW. Generic functions of railway stations. A conceptual basis for the development of common system understanding and assessment criteria. *Transport Policy*. 2011;18(2):446-455. doi: 10.1016/j.tranpol.2011.02.001
3. Zhuravleva NA, Wright J, Michalkova L, Musa H. Sustainable urban planning and internet of things-enabled big data analytics: Designing, implementing, and operating smart management systems. *Geopolitics, History, and International Relations*. 2020;12(1):59-65. doi: 10.22381/GHIR12120204
4. Zhuravleva NA, Nica E, Durana P. Sustainable smart cities: networked digital technologies, cognitive Big Data analytics, and information technology-driven economy. *Geopolitics, History, and International Relations*, 2019;11(2):41-47. doi: 10.22381/GHIR11220196
5. Lyakina M, Sheehy M, Podhorska I. Networked and Integrated Urban Technologies in Internet of Things-enabled Smart Sustainable Cities. *Geopolitics, History, and International Relations*. 2019;11(2):62-68. doi: 10.22381/GHIR11220199
6. Youd F. The digitalisation of railway: Kryptonite for the industry? *Railway Technology* [Internet]. 2022 Jun [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://www.railway-technology.com/sector/infrastructure/>
7. Schrage M, Kiron D, Hancock B, Breschi R. Performance management's digital shift. *MITSloan Management Review* [Internet]. 2019 Feb [cited 2022 Aug 25]. Available from: <https://sloanreview.mit.edu/projects/performance-managements-digital-shift>
8. Kazanskaya L, Proskuryakova E. Improvement of work of urban public transport based on passenger traffic simulation. *Urbanism. Architecture. Constructions*. 2021;12(1):5-12.

9. Zhuravleva N, Guliy I, Shavshukov V. Simulation modeling of changes in demand for rail transportation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 403, XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry 10–13 September 2019, Don State Technical University, Russian Federation; 2019. doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012230
10. Dimeery I, Baraka M, Ahmed SM, et al. Design and Construction of Smart Cities: Toward Sustainable Community; Conference proceedings; 2021 February, Springer; 2021. 394 p.
11. Li D, Yang X, Xu X. A Framework of Smart Railway Passenger Station Based on Digital Twin. In: CICTP 2020; 20th COTA International Conference of Transportation. 2020 Aug 14-16; Xi'an, China pp. 2623-2634. doi: 10.1061/9780784482933.226
12. Ohyun J, Kim Y-K, Kim J. Internet of things for smart railway: feasibility and applications. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018;5(2):482-490. doi: 10.1109/JIOT.2017.2749401
13. Namiot D, Pokusaev O, Kupriyanovsky V. On railway stations statistics in Smart Cities. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(4):19-24.
14. Shaltout RE. Key Challenges of Smart Railway Station. In: Design and Construction of Smart Cities, Toward Sustainable Community; January 2021. p. 287-294. doi: 0.1007/978-3-030-64217-4\_33
15. Bubeliny O, Kubina M, Varmus M. Railway Stations as Part of Mobility in the Smart City Concept. *Transportation Research Procedia*. 2021;53:274-281. doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.039

#### Сведения об авторах:

**Никонова Яна Игоревна**, к.э.н., доцент;

eLibrary SPIN: 3827-3955; ORCID: 0000-0001-6331-4371

E-mail: ya\_shka@list.ru

**Проскурякова Елена Александровна**, к.э.н., доцент;

eLibrary SPIN: 8593-3057; ORCID: 0000-0002-5892-1297;

E-mail: eaprosk@gmail.com

#### Information about the authors:

**Yana I. Nikonova**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 3827-3955; ORCID: 0000-0001-6331-4371;

E-mail: ya\_shka@list.ru

**Elena A. Proskuryakova**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 8593-3057; ORCID: 0000-0002-5892-1297;

E-mail: eaprosk@gmail.com

#### Цитировать:

Никонова Я.И., Проскурякова Е.А. Цифровизация железнодорожных вокзальных комплексов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 31–44. doi: 10.17816/transsyst20228331-44

#### To cite this article:

Nikonova YI, Proskuryakova EA. Digitalization of railway station complexes. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2022;8(3):31-44. doi: 10.17816/transsyst20228331-44

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

УДК [UDC] 699.852

DOI 10.17816/transsyst20228345-62

© А.Э. Юницкий, А.С. Хлебус, М.И. Цырлин

ЗАО «Струнные технологии»

(Минск, Республика Беларусь)

## ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ГИБКОГО РЕЛЬСА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬСО-СТРУННОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ЦЕНТРЕ uSky В ШАРДЖЕ (ОАЭ)

**Обоснование:** В работе дано описание устройства рельсо-струнной путевой структуры и струнного рельса; представлен тестовый участок путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ).

**Цель:** Расчет жесткости гибкого рельса при действии подвижной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия; определение усилий в элементах гибкого рельса, размах напряжений и долговечность гибкого рельса от действия циклической транспортной нагрузки юникар-Т (тропический).

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

**Результаты:** Анализ результатов расчета показал высокую эффективность и надежность предложенного транспортного решения, учитывая соотношение материалоемкости струнного рельса к несущей способности путевой структуры.

**Ключевые слова:** рельсо-струнная путевая структура, uST, uSky, юникар тропический, струнный рельс, жесткость гибкого рельса, напряженно-деформированное состояние рельсо-струнной путевой структуры.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© A.E. Unitsky, A.S. Khlebus, M.I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc.

(Minsk, Republic of Belarus)

## EVALUATION OF FLEXIBLE RAIL RIGIDITY AND STRESS-STRAIN STATE OF ELEMENTS OF STRING RAIL TRACK STRUCTURE AT THE uSky CENTER IN SHARJAH (UAE)

**Annotation:** The study describes the arrangement of the string rail track structure and string rail; a test section of the track structure with flexible rail at the uSky Transport Center in Sharjah (UAE) is presented.

**Aim:** analysis of rigidity of flexible rail under action of transport load and its dependence on temperature impact, as well as calculation of forces in elements of flexible rail are performed; the stress range and durability of the flexible rail under cyclic transport load from Unicar-T (tropical) are determined.

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

**Results:** Analysis of the calculation results showed high efficiency and reliability of the proposed transport solution, taking into account the ratio of the material intensity of the string rail to the bearing capacity of the track structure.

**Key words:** string rail track structure, uST, uSky, tropical Unicar, string rail, flexible rail rigidity, stress-strain state of string rail track structure.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных инновационных составляющих струнных транспортных систем Unitsky String Technologies (uST) является рельсо-струнная эстакада. Внешне она напоминает автомобильную или железнодорожную эстакаду, систему опор, на которых располагается дорожное полотно. Однако, в отличие от автомобильных или железнодорожных эстакад, у эстакады uST есть уникальные технологические отличия, которые обеспечивают ей преимущества при эксплуатации.

Главное из таких отличий – неразрезная конструкция струнных рельс. В отличие от, например, автомобильной эстакады, которая состоит из нескольких независимых пролетов между опорами, эстакада uST имеет единую, неразрезную, монолитную конструкцию, что очень важно. Если у автомобильной эстакады убрать даже одну опору, пролетное строение рухнет под собственным весом, и ехать по такой эстакаде станет невозможно. В случае с эстакадой для струнного транспорта, если даже несколько соседних опор будут уничтожены, например, в результате террористического акта, путевая структура останется целой, потому что нагрузка распределится на соседние опоры благодаря натянутым стальным канатам (струнам) внутри рельсов.

Другое важное отличие заключается в том, что опоры эстакады uST держат на себе только рельсо-струнную ферму или легкий струнный рельс, в отличие от автомобильной эстакады, содержащей тяжелое сплошное дорожное полотно, уложенное на мощные стальные или железобетонные балки. Именно поэтому внешне опоры эстакады струнного транспорта выглядят такими легкими, в отличие от массивных железобетонных опор, входящих в структуру автомобильных и железнодорожных эстакад [1].

Перечисленные технологические особенности дают струнным эстакадам целый ряд преимуществ:

– в эстакаде uST собственный вес эстакады составляет порядка 10 % от расчетной нагрузки, тогда как в обычной эстакаде – более 90 %. То есть при прочих равных условиях, эстакада uST может выдержать в разы больше полезной нагрузки: подвижного состава и пассажиров;

– сплошное дорожное полотно в обычной эстакаде требует дополнительных затрат. При возведении эстакады uST необходимо на порядок меньшее количество строительных материалов, что в разы снижает стоимость строительства;

– при одинаковой распределенной нагрузке неразрезная (без температурных швов и стыков) эстакада uST в 5 раз жестче и в 3 раза прочнее традиционного балочного моста. При одинаковой сосредоточенной силе эстакада струнного транспорта в 1,9 раза жестче и в 1,5 раза прочнее традиционного балочного моста.

Внешне близкие конструкции классических и рельсо-струнных эстакад имеют важные различия, которые в итоге делают струнные транспортные системы uST эффективнее всех современных наземных видов транспорта в эстакадном исполнении.

Основа технологии uST – струнный рельс. Струнный рельс представляет собой монолитную балку или ферму, внутри которой находятся растянутые арматурные канаты (струны). Остальное пространство внутри рельса заполнено специальным композитом или бетоном, которые обладают антикоррозийными свойствами [2].

Такая структура предварительно напряженного рельса дает множество преимуществ:

- высокая прочность и долговечность за счет непрерывности и монолитности пути;
- простота изготовления и монтажа;
- высокая относительная жесткость конструкции – как у мостов и путепроводов для высокоскоростных железных дорог;
- конструктивный минимализм, низкий расход материалов;
- ровность пути благодаря натянутым высокими усилиями стальным канатам внутри рельсов;
- отсутствие температурных швов и стыков;
- высокая плавность хода подвижного состава, низкий шум и вибрации;
- минимальные затраты энергии на движение за счет использования плоской головки рельса и цилиндрического стального колеса;
- широкий диапазон рабочих температур.

Все это также обеспечивает достижение самых высоких показателей эксплуатации транспорта – высоких скоростей движения, минимальных ударных нагрузок и низких затрат энергии.

Сегодня в ЗАО «Струнные технологии», г. Минск, Беларусь, разработаны пять типов струнных рельсов для разных условий эксплуатации:

- 1) **жесткий рельс** (или ферма); допустимая скорость: до 500 км/ч; длина пролета: до 100 м;
- 2) **полужесткий рельс**; допустимая скорость: до 350 км/ч; длина пролета: до 100 м;
- 3) **гибкий рельс**; допустимая скорость: до 150 км/ч; длина пролета: до 2000 м;
- 4) **полугибкий рельс** (с поддерживающим канатом); допустимая скорость: до 500 км/ч; длина пролета: до 2000 м;
- 5) **сверхлегкий рельс** (колтюбинговая труба); допустимая скорость: до 150 км/ч; длина пролета: до 1500 м.

Также струнный рельс сочетает в себе свойства гибкой нити на большом пролете между опорами и жесткой балки на малом пролете – под колесом рельсового электромобиля и над опорой. Поэтому в разных вариациях рельсо-струнную путевую структуру можно использовать как для прокладки трасс между небоскребами на большой высоте, так и для перевозки грузовых контейнеров по тяжелой ферменной структуре из порта, размещенного на шельфе моря.

Струнный рельс – уникальная технологическая инновация, сочетающая в себе преимущества железнодорожного рельса с эффективными характеристиками натянутой стальной нити.

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Тестовый участок рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом в Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ) – многопролетная бирельсовая транспортная эстакада длиной 400 м, состоящая из предварительно напряженных рельсов, не имеющих температурных швов, замкнутых на концевые (анкерные) опоры и опирающихся на промежуточные опоры посредством опорных седел [3]. Функция седел состоит в обеспечении плавного изменения жесткости в месте крепления рельса к опоре, для комфортного передвижения транспортных средств с проектной скоростью. Путевая структура, инженерные коммуникации размещаются выше уровня земли с целью обхода занятой территории или транспортных потоков. Применение данного типа структур наиболее оптимально при пересечении местности со сложным рельефом и преодолении природных преград (реки, озера, каньоны, горные разломы).

С точки зрения строительной механики путевая структура представляет собой «жесткую нить». Данная конструкция отличается весьма низким погонным весом рельсового полотна (не более 24 кг/м.п.) и, как следствие, минимальными расходами на строительные материалы.

Подбор оптимальных сечений, применение качественных материалов с высокими прочностными характеристиками и специальных технологий позволяют соответствовать предъявленным нормативным требованиям по прочности, надежности и эксплуатационной безопасности как конструкции в целом, так и отдельных ее элементов.

Тестовый участок состоит из трех пролетов, длина центрального пролета составляет 200 м, двух крайних – по 100 м. Максимальный уклон пути при движении транспортного средства – рельсового электромотоцикла на стальных колесах, получившего название юнимобиль (uPod – на англ.), полной массой до 5000 кг – 8 % (либо 4,6 градуса) во всем эксплуатационном диапазоне температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  (нагрев конструкции на солнце), который возможен в ОАЭ с вероятностью один раз в 100 лет. Минимальный радиус кривизны пути в продольно-вертикальной плоскости в зоне высотных промежуточных опор составляет около 75 м при длине опорного седла 15 м, что позволяет комфортно преодолевать данные участки пути.

На Рис. 1 представлен общий вид путевой структуры, на схеме указаны вертикальные отметки рельса в зоне анкерных и промежуточных опор, стрелками указано направление силового воздействия на опоры от предварительно напряженного гибкого рельса.

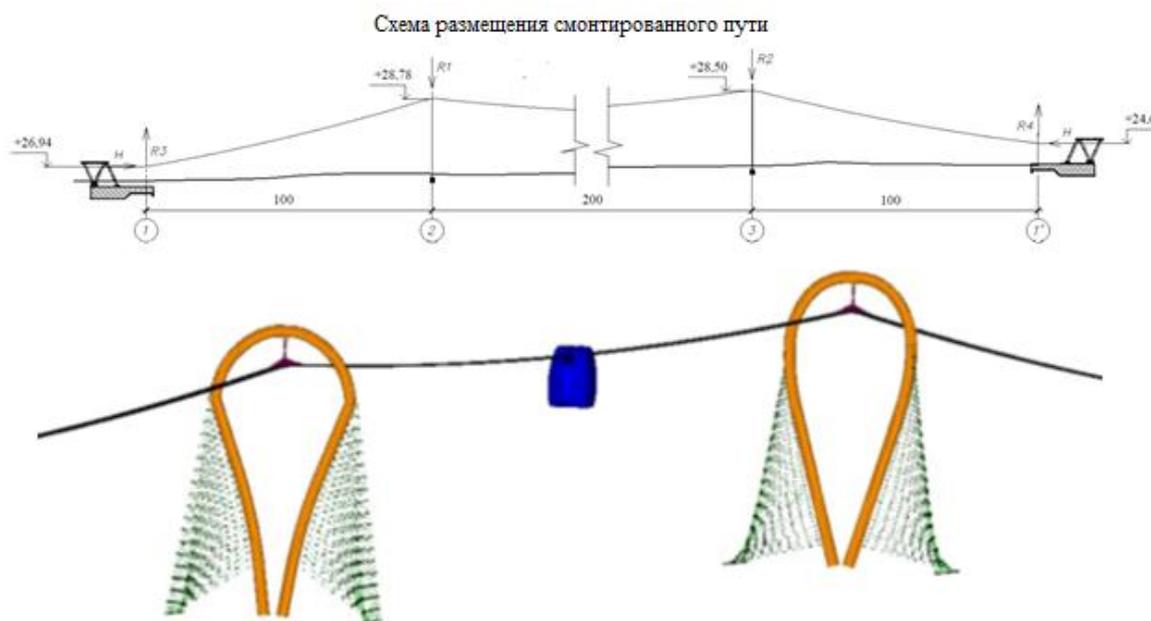


Рис. 1. Общий вид тестового участка

Рельсо-струнная путевая структура состоит из двух отдельных рельсов (левый и правый), связанных между собой стальными перемычками с шагом 2 м (Рис. 2). Каждый рельс включает предварительно напрягаемые элементы: внутренние – высокопрочные арматурные канаты диаметром 15,2 мм, и внешний корпус – U-образный

профиль из высокопрочной стали. Совместная работа корпуса и внутренних канатов обеспечена наполнителем, который также защищает канаты от неблагоприятных воздействий окружающей среды, обеспечивая тем самым их долговечность [4].

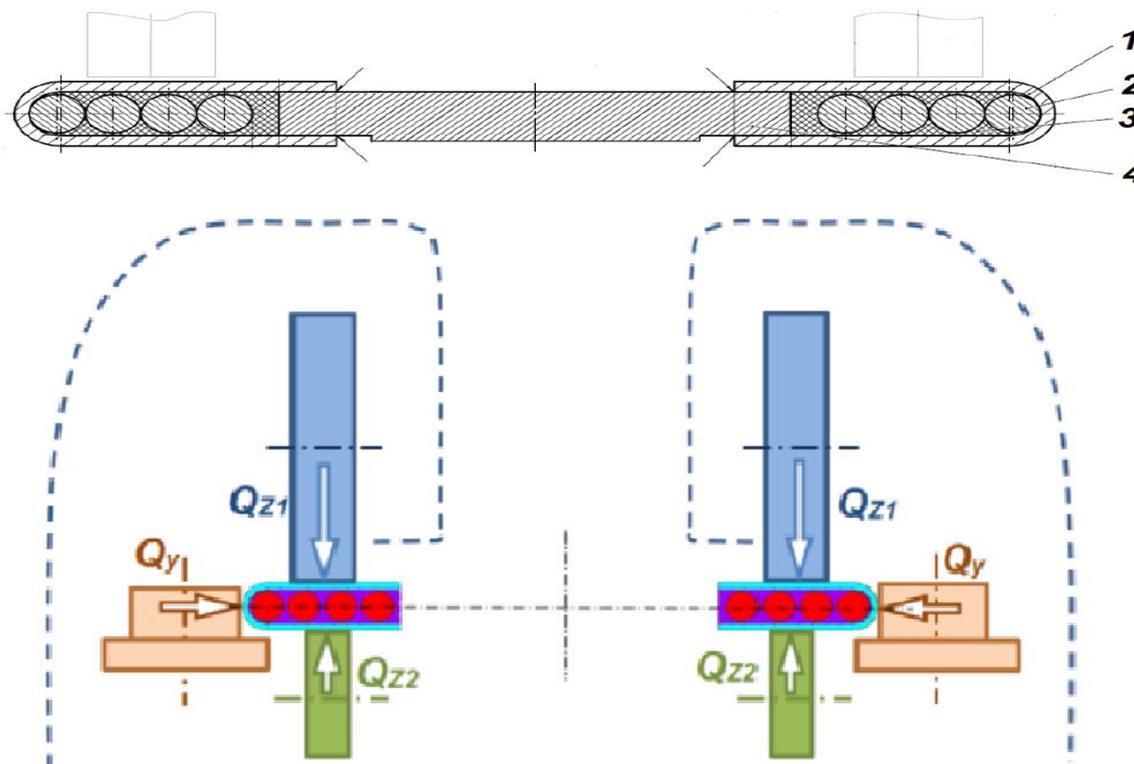


Рис. 2. Поперечное сечение гибкого струнного рельса и схема силового воздействия от колес подвесного бирельсового транспортного средства

- 1 – U-образный профиль из высокопрочной стали (корпус рельса);  
 2 – высокопрочный стальной канат (струна рельса);  
 3 – наполнитель;  
 4 – переключка;  
 $Q_{z1}$  – вертикальное силовое воздействие от опорного колеса подвесного рельсового электромобиля (юнимобиля);  
 $Q_{z2}$  – вертикальное силовое воздействие от поджимного колеса юнимобиля;  
 $Q_y$  – поперечное силовое воздействие от направляющего колеса

В Табл. 1 приведены массо-инерционные характеристики поперечного сечения гибкого рельса, в Табл. 2 – свойства применяемых в конструкции строительных материалов.

Таблица 1. Масс-инерционные характеристики гибкого рельса

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Площадь поперечного сечения корпуса (2 шт.)	$A_a$	см <sup>2</sup>	14,7
Площадь поперечного	$A_c$	см <sup>2</sup>	8,0

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
сечения заполнителя (2 шт.)			
Площадь поперечного сечения канатов (8 шт.)	$A_s$	см <sup>2</sup>	13,2
Суммарная площадь поперечного сечения, приведенная к стали	$A$	см <sup>2</sup>	28,3
Момент инерции поперечного сечения, приведенный к стали (при расчетах на изгиб от действия вертикальных поперечных сил)	$I_{y-y}$	см <sup>4</sup>	18,0
Момент сопротивления поперечного сечения, приведенный к стали (при расчетах на изгиб от действия вертикальных поперечных сил)	$W_{y-y}$	см <sup>3</sup>	14,1
Погонная масса всех элементов гибкого рельса	$m$	кг/м.п.	23,6

Таблица 2. Расчетные характеристики строительных материалов гибкого рельса

Характеристики материалов	Корпус	Струна	Заполнитель	Перемычка
Обозначение на Рис. 2	1	2	3	4
Материал	U-образный профиль из стальной полосы	Высокопрочный арматурный канат	Двухкомпонентный композит	Сталь
Модуль упругости, МПа	210000	200000	10000	210000
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,35	0,3
Предел текучести, МПа	700	1636	-	-
Предел прочности, МПа	750	1860	30	350
Погонный вес, кг/м	5,78 x 2	1,298 x 8	0,828 x 2	-

## МЕТОД И ЦЕЛЬ РАСЧЕТА, РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Метод расчета – статический линейно-упругий расчет по теории второго порядка, который позволяет определять величины в сечениях (силы, моменты, напряжения, деформации) в любой точке конструкции на основе линейного деформирования строительных материалов и

геометрии деформированной несущей конструкции, т. е. с учетом нелинейности деформаций [5]. При таком методе расчета учитывается взаимное влияние усилий (например, продольно-поперечный изгиб).

Цель расчета – оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной пути на основе конечно-элементного анализа. В частности, ставятся задачи:

- расчет жесткости гибкого рельса при действии транспортной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия;
- расчет усилий (линии влияния) в элементах гибкого рельса и их зависимости от температурного воздействия;
- оценка размаха напряжений и долговечности элементов гибкого рельса от действия циклической транспортной нагрузки юникар-Т (тропический) при штатных режимах эксплуатации.

Для решения поставленных задач была разработана конечно-элементная модель рельсо-струнной путевой структуры на основе балочных и оболочечных элементов (Рис. 3). Геометрия поперечных сечений элементов, вертикальные отметки опорных узлов, а также граничные условия в полной мере соответствуют конструкции путевой структуры.

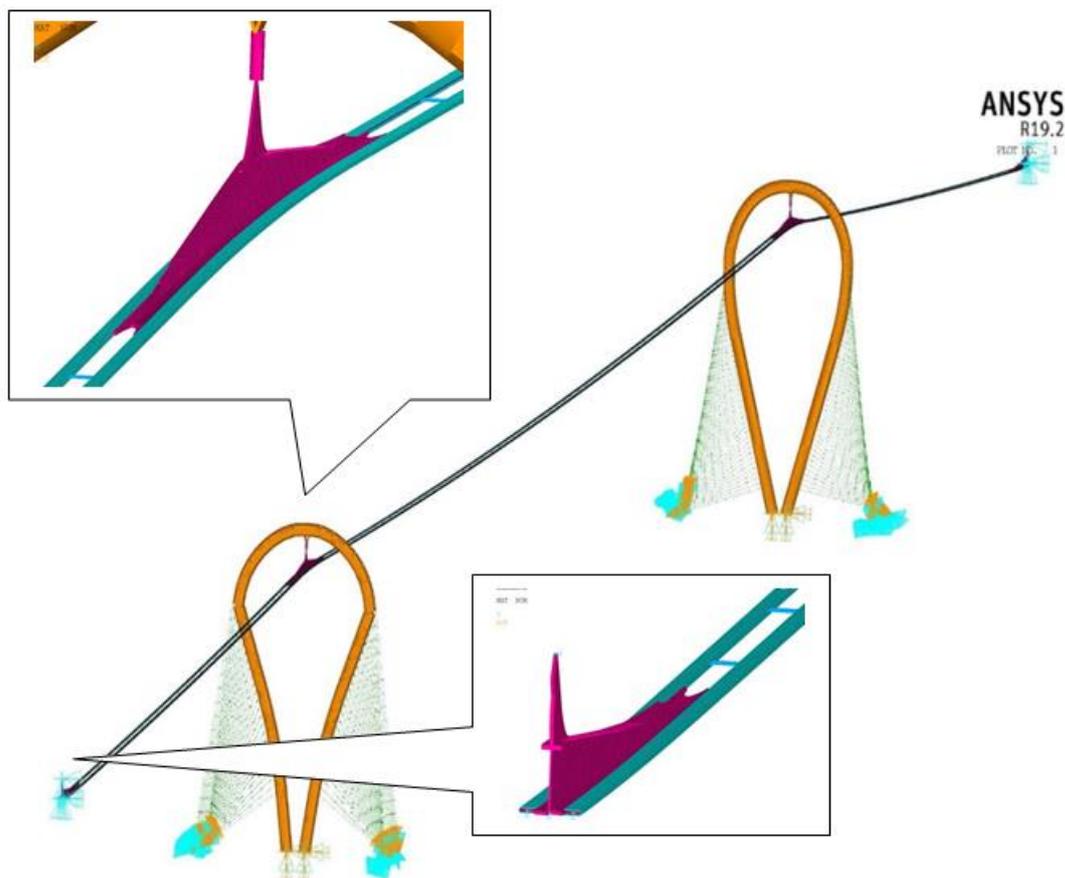


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели рельсо-струнной путевой структуры с гибким рельсом

## ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЛЬСО-СТРУННОГО ПУТИ ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Собственный вес рельсового полотна составляет  $q=23,6$  кг/м.п. Суммарное расчетное натяжение всех элементов рельса, соответствующее температуре замыкания  $t_0=+35$  °С, составляет  $N_0=1970$  кН. При изменении температуры окружающей среды, воздействии на элементы гибкого рельса солнечной радиации, ветровых потоков происходит и изменение их температуры, а соответственно, и натяжения ввиду замкнутости системы и изменения внутренних напряжений. Например, при минимальной расчетной температуре  $t_{\min}=-10$  °С суммарное натяжение увеличится до 2312 кН, а при максимальной расчетной температуре  $t_{\max}=+80$  °С – уменьшится до 1648 кН.

Изменение натяжения сопровождается изменением деформированного состояния гибкого рельса и величины его максимального провиса. На Рис. 4 представлены линии гибкого рельса от действия постоянных сил (гравитации) при минимальной ( $-10$  °С), максимальной ( $+80$  °С) и номинальной ( $+35$  °С) температурах.

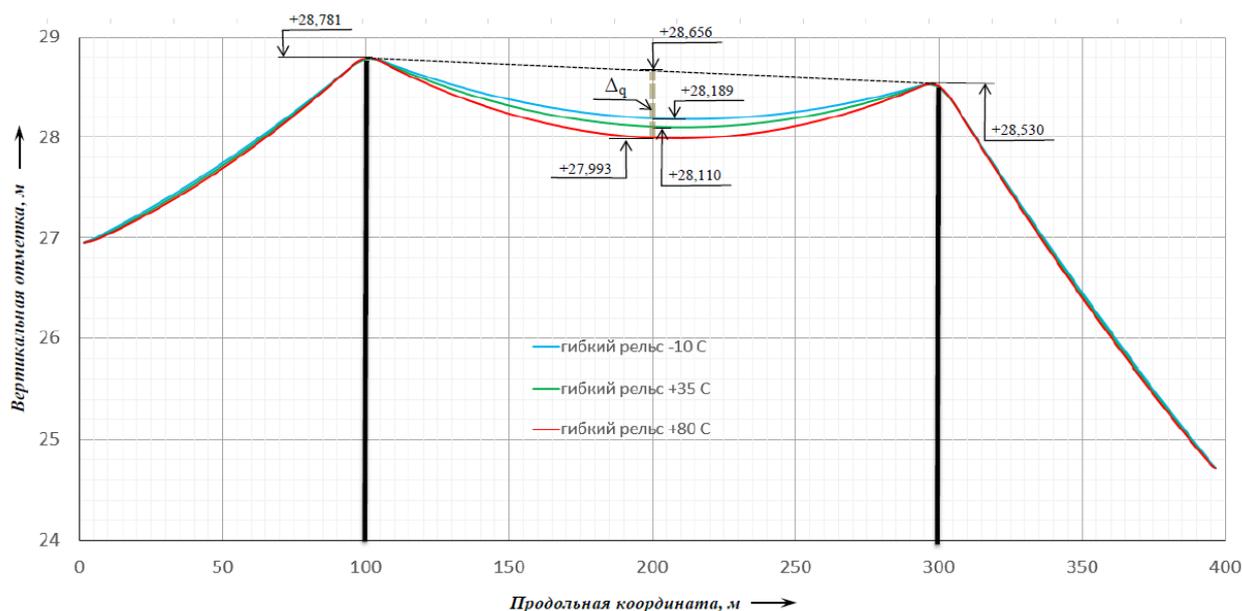


Рис. 4. Линия провеса гибкого рельса при различной температуре путевой структуры (при действии постоянных воздействий – собственный вес и предварительное натяжение)

Основные параметры деформированного рельса (максимальный провис, соответствующее натяжение) при различных температурах указаны в Табл. 3.

Таблица 3. Параметры деформированного состояния гибкого рельса от действия собственного веса

Температура рельса, °С	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Расчетное натяжение рельса $N$ , кН	2312	1970	1648
Вертикальная отметка рельса на продольной координате 200 метров, м	+28,189	+28,110	+27,993
Максимальный провис рельса от собственного веса $\Delta q$ (середина пролета 200 метров), м	0,467	0,546	0,663

Полная расчетная масса нагрузки от юнимобиля юникар-Т – 4550 кг [6, 7], распределенная на две опорные оси (четыре колеса) с колесной базой 2,5 м.

На Рис. 5 представлен общий деформированный вид путевой структуры при нагружении транспортной нагрузкой в середине двухсотметрового пролета с указанием величины максимального прогиба гибкого рельса (в метрах).

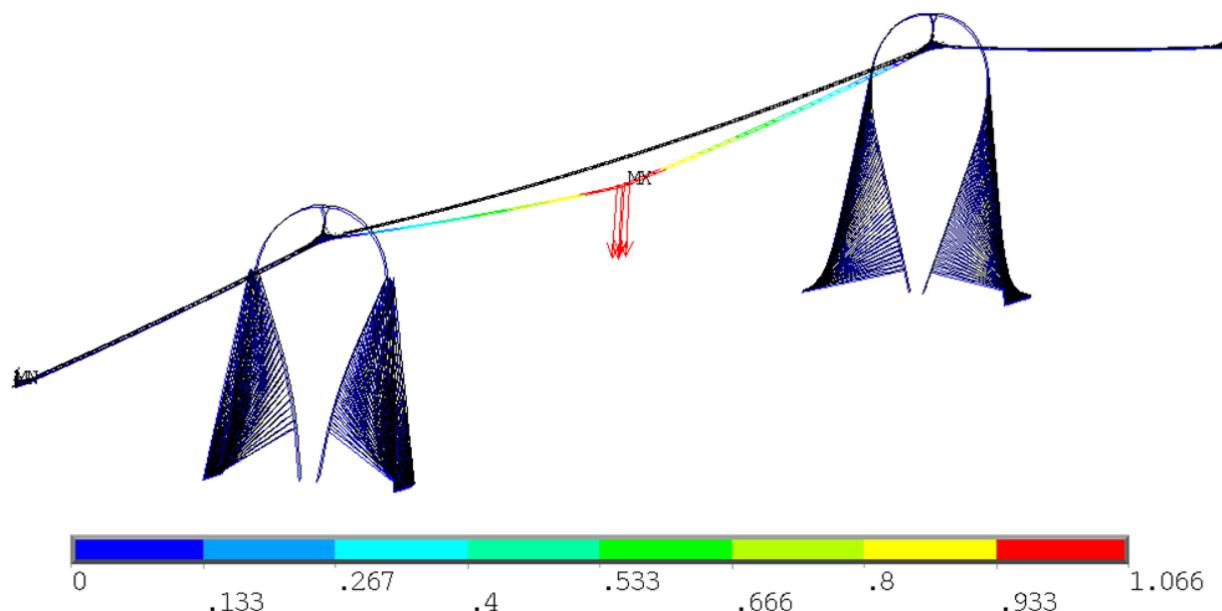


Рис. 5. Общий вид деформированного состояния гибкого рельса при нагружении весом юникара-Т полной массой 4550 кг при температуре +35 °С

В Табл. 4 указаны основные параметры деформированного рельса (максимальный провис, соответствующее натяжение) при различных температурах.

Таблица 4. Параметры деформированного состояния гибкого рельса от действия подвижной нагрузки

Температура рельса, °С	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Начальное натяжение рельса $N_0$ , кН	2312	1970	1648
Максимальное натяжение рельса при воздействии транспортной нагрузки от юникара-Т полной массой 4550 кг $N$ , кН	2339	2009	1703
Увеличение натяжения элементов гибкого рельса от подвижной нагрузки $\Delta N$ , кН	27	39	55
Максимальный провис рельса от веса юникара-Т $\Delta P$ (середина пролета 200 м), м	0,922	1,066	1,250

На Рис. 6 представлены сплошные линии – линии гибкого рельса при отсутствии транспортной нагрузки, штриховые – траектории движения условного центра неподрессоренной массы (середина отрезка, соединяющего точки контакта переднего и заднего колес юникара-Т с путевой структурой).

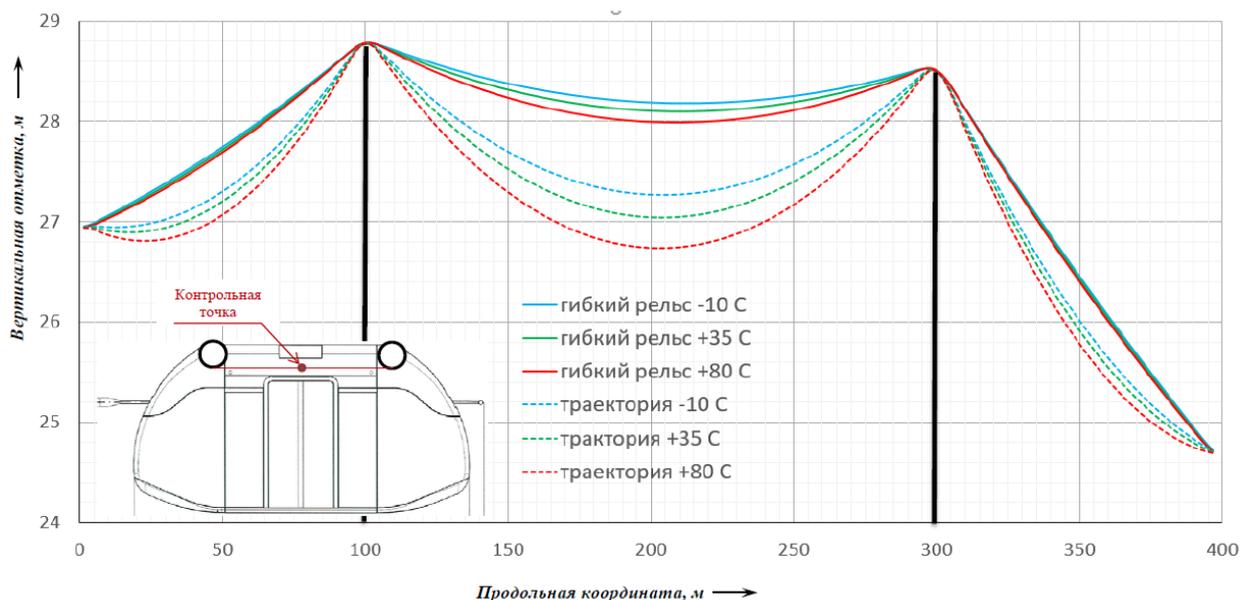


Рис. 6. Линия гибкого рельса и траектории движения юникара-Т (полная масса 4550 кг) при различной температуре путевой структуры; траектория привязана к контрольной точке – середина отрезка, соединяющего точки контакта переднего и заднего колес юникара-Т с рельсовым полотном

На Рис. 7, 8 указаны зависимости прогибов гибкого рельса и уклонов рельсо-струнного пути при движении юникара-Т во всем эксплуатационном диапазоне температур (от -10 °С до +80 °С). Максимальные величины прогибов характерны для середин пролетов, максимальные уклоны пути – в зонах приближения к опорным седлам.

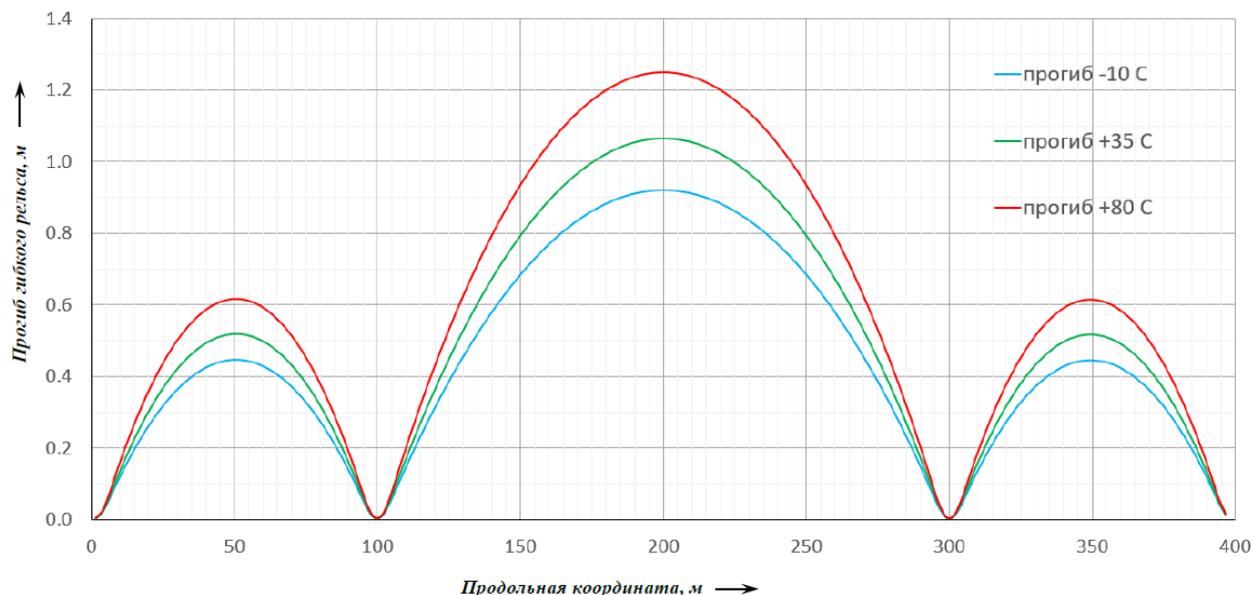


Рис. 7. Деформативность гибкого рельса при движении юникара-Т (полная масса 4550 кг) и различной температуре путевой структуры

Наибольший прогиб рельса при движении юникара-Т при температуре +80 °C составляет 1,25 м.

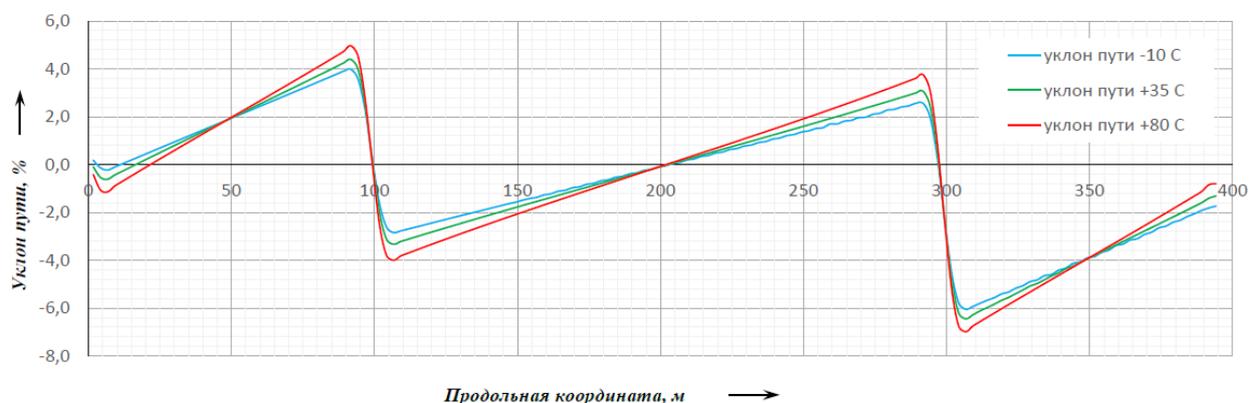


Рис. 8. Уклон рельсо-струнного пути при движении юникара-Т (полная масса 4550 кг) и различной температуре путевой структуры

Ввиду выбора оптимального сечения струнного рельса, определяющего его низкий погонный вес и достаточное натяжение, изменение температурного воздействия в диапазоне от -10 °C до +80 °C незначительно влияет на величину максимального провиса на пролете 200 метров (-8/+12 см от собственного веса и -14/+18 см от юникара-Т)

## ОЦЕНКА РАЗМАХА НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ГИБКОГО РЕЛЬСА ОТ ЦИКЛИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ШТАТНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Величина размаха напряжений в элементах рельса при воздействии от подвижного состава непосредственно определяет усталостную выносливость несущих элементов рельса и является определяющим критерием выбора конструктивных параметров. В гибких системах максимальный размах напряжений можно оценить по формуле

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

где

$\Delta\sigma_N$  – минимальное напряжение, МПа;

$\Delta\sigma_M$  – максимальное напряжение, МПа;

$\Delta N_{\max}$  – натяжение, кН;

$A$  – площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>;

$M_{\max}$  – максимальный момент, Н×м;

$W$  – момент сопротивления сечения, см<sup>3</sup>.

На Рис. 9 представлен общий вид эпюры изгибающего момента, действующего на гибкий рельс в зоне контакта с колесом юнимобиля.

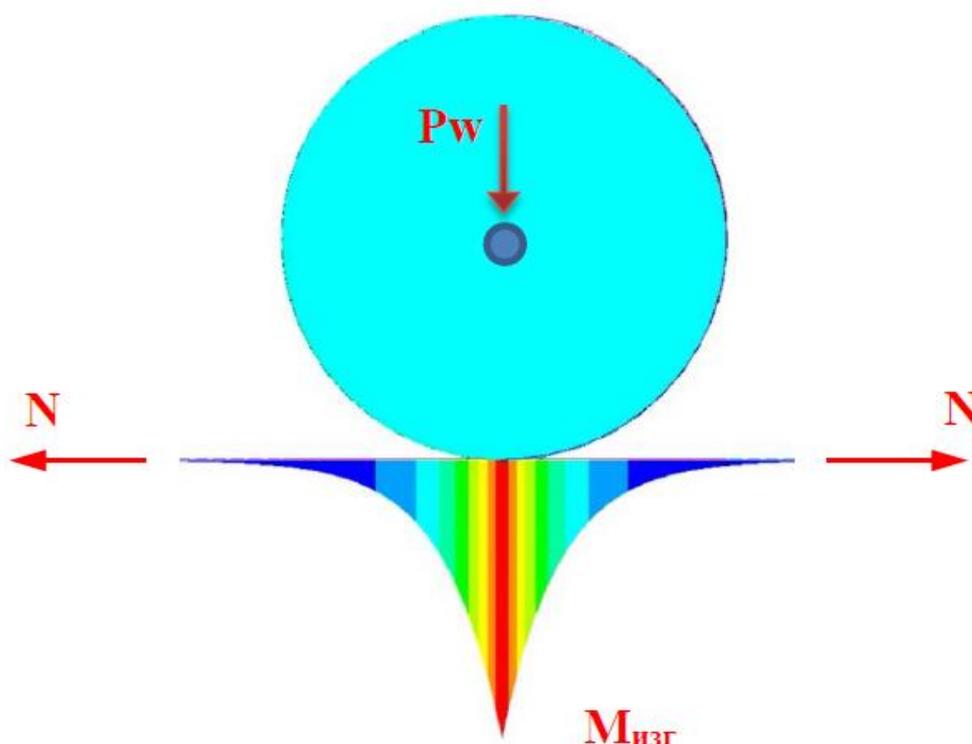


Рис. 9. Общий вид эпюры изгибающего момента, действующего на гибкий рельс в зоне контакта с колесом юнимобиля

В Табл. 5–8 приведена оценка максимального размаха напряжений в несущих элементах гибкого рельса – корпусе и канатах. Наиболее нагруженная зона – нижние грани элементов в середине двухсотметрового пролета тестовой трассы. Подвижная нагрузка – юникар-Т полной масса 4550 кг, равномерно распределенной на четыре опорных колеса.

Таблица 5. Оценка размаха напряжений в корпусе рельса при движении четырехколесного юникара-Т полной массой 4550 кг с нагрузкой на колесо 11,16 кН (середина пролета 200 метров)

Расчетный параметр (с расчетом на один U-образный профиль)	Температура элементов		
	-10 °C	+35 °C	+80 °C
Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	7,37	7,37	7,37
Начальное натяжение $N_0$ , кН	271,1	183,9	97,7
Максимальное натяжение $N$ , кН	278,2	194,3	112,1
Изменение натяжения $\Delta N_{\max}$ , кН	7,1	10,4	14,4
Размах напряжений от донатяжения при проезде юнимобиля $\Delta \sigma_N$ , МПа	10	14	20
Момент сопротивления сечения $W$ , см <sup>3</sup>	7,1	7,1	7,1
Локальный изгибающий момент $M_{\text{изг}}$ , Н·м	590	639	700
Размах напряжений от изгибающего момента под колесом	83	90	99

Таблица 6. Величина размаха напряжений в корпусе рельса (наиболее нагруженная зона – нижняя грань корпуса в середине 200-метрового пролета)

Параметр	Обозначение	Температура элементов рельса			Категория элемента* $\Delta \sigma_c$ , МПа
		-10 °C	+35 °C	+80 °C	
Минимальное	$\sigma_{\min}$ , МПа	368	250	133	160
Максимальное	$\sigma_{\max}$ , МПа	461	354	252	
Размах напряжений	$\Delta \sigma_R$ , МПа	93	104	119	

\* Категория элемента – это численное значение, присвоенное конкретному элементу при заданном направлении колебаний напряжения для определения кривой сопротивления усталости, что соответствует справочному значению предела выносливости  $\Delta \sigma_c$  при базовом числе циклов  $N_c=2$  млн.

Таблица 7. Оценка размаха напряжений в несущем канате при движении четырехколесного юникара-Т полной массой 4550 кг с нагрузкой на колесо 11,16 кН (середина пролета 200 метров)

Расчетный параметр (с расчетом на один арматурный канат)	Температура элементов рельса		
	-10 °С	+35 °С	+80 °С
Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	1,65	1,65	1,65
Начальное натяжение $N_0$ , кН	219,9	200,3	180,8
Максимальное натяжение $N$ , кН	221,5	202,6	184,1
Изменение натяжения $\Delta N_{\max}$ , кН	1,6	2,3	3,3
Размах напряжений от донатяжения при проезде	10	14	20
Момент сопротивления сечения $W$ (в составе сечения), см <sup>3</sup>	11,8	11,8	11,8
Локальный изгибающий момент $M_{\text{изг}}$ , Н·м	590	639	700
Размах напряжений от изгибающего момента под колесом, МПа	50	54	59

Таблица 8. Величина размаха напряжений в арматурном канате (наиболее нагруженная зона – нижняя грань корпуса в середине двухсотметрового пролета)

Параметр	Обозначение	Температура элементов			Категория элемента $\Delta \sigma_c$ , МПа
		-10 °С	+35 °С	+80 °С	
Минимальное	$\sigma_{\min}$ , МПа	1333	1214	1096	160
Максимальное	$\sigma_{\max}$ , МПа	1393	1282	1175	
Размах напряжений	$\Delta \sigma_R$ , МПа	60	68	79	

Представленные результаты позволяют оценить долговечность и надежность конструкции по методологии, изложенной в литературе [8]. Согласно результатам расчета, в данной конструкции обеспечена долговечность корпуса рельса не менее 10 млн. циклов, несущих канатов – не менее 78 млн. циклов, что гарантирует безопасную эксплуатацию путевой структуры не менее 100 лет при круглогодичной эксплуатации с интервалом движения юнимобиля около 2 минут.

Расчет жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры производился при помощи программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS [9].

Выполненные расчеты были использованы при проектировании и строительстве тестового участка рельсо-струнной путевой структуры в исследовательском Центре uSky Transport в Шардже (ОАЭ) (Рис. 10) [1].



Рис. 10. Гибкая рельсо-струнная путевая структура  
в Центре uSky Transport в Шардже

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе произведен расчет жесткости гибкого рельса при действии подвижной нагрузки и ее зависимости от температурного воздействия; установлены усилия в элементах гибкого рельса; определен размах напряжений и долговечность гибкого рельса от действия циклической нагрузки – юникара-Т. Анализ результатов расчета доказывает высокую эффективность и надежность предложенного транспортного решения, учитывая соотношение материалоемкости струнного рельса (24 кг/м) к несущей способности путевой структуры (эксплуатационная нагрузка – подвижной состав полной массой 4,55 т).

## 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.)]. Ссылка активна на: 26.09.2022. 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. Юницкий А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии uST / Альбом. – Минск: ЗАО «Струнные технологии, 2021. – 94 с. [Yunitskii AE. *Innovatsionnye transportno-infrastrukturnye tekhnologii uST / Album*. Minsk: Unitsky String Technologies, Inc.; 2021. 94 p. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2022-2-3-7
3. Патент ЕА № 037758. Транспортная система Юницкого (варианты) / Юницкий А.Э. – МПК В62D 35/00, заявл. 12.07.2019; опубл. 19.05.2021. [Patent EA № 037758. *Transportnaya sistema Yunitskogo (varianty)*. Yunitskii AE. IPC B62D 35/00, filed 12.07.2019; publ. 19.05.2021 (In Russ.)].
4. Патент ЕА № 031807. Рельс транспортной системы / Юницкий А.Э. – МПК В62D 35/00, заявл. 09.06.2017; опубл. 28.02.2019. [Patent EA № 031807. *Rel's transportnoi sistemy*. Yunitskii AE. IPC B62D 35/00, filed 09.06.2017; publ. 28.02.2019. (In Russ.)].
5. ТКП EN 1990-2011 (02250) Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций / МАиС РБ. – Минск, 2015. – 86 с. [ТССР EN 1990-2011 (02250) Eurocode. *Osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstruksii* / МАиС РБ. Minsk; 2015. 86 p. (In Russ.)].
6. Средство транспортное Юникар U4-430. Руководство по эксплуатации. – Минск, 2018. – 114 с. [*Sredstvo transportnoe Yunikar U4-430. Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Minsk; 2018. 114 p. (In Russ.)].
7. Юницкий А.Э., Гарах В.А., Зайцев А.Д., Цырлин М.И. Конструктивные особенности юникара тропического для городских перевозок пассажиров // Инновационный транспорт. – 2021. – № 1. – С. 8–15. [Yunitskii AE, Garakh VA, Zaitsev AD, Tsyrlin MI. *Design features of the tropical unicar for urban passenger transport*. *Innotrans*. 2021;(1):8-15. (In Russ.)]. doi: 10.20291/2311-164X-2021-1-8-15.
8. ТКП EN 1993-1-9-2009 (02250) Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–9. Усталостная прочность / МАиС РБ. Минск, 2010. – 43 с. [ТССР EN 1993-1-9-2009 (02250) Eurocode 3. *Proektirovanie stal'nykh konstruksii. Chast' 1-9. Ustalostnaya prochnost'* / МАиС РБ. Minsk; 2010. 43 p. (In Russ.)].
9. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. – Нижний Новгород: НГУ, 2006. – 115 с. [Zhidkov AV. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya*. Nizhnii Novgorod: NGU; 2006. 115 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 26.09.2022. Доступно по: [www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf?ysclid=l8irg6k8cj922416463](http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/1.pdf?ysclid=l8irg6k8cj922416463)

#### Сведения об авторах:

**Цырлин Михаил Иосифович**, кандидат технических наук, ведущий специалист;  
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

**Information about the authors:**

**Michael I. Tsyrlin**, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist;

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

**Цитировать:**

Юницкий А.Э., Хлебус А.С., Цырлин М.И. Оценка жесткости гибкого рельса и напряженно-деформированного состояния элементов рельсо-струнной путевой структуры в центре uSky в Шардже (ОАЭ) // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 45–62. doi: 10.17816/transsyst20228345-62

**To cite this article:**

Unitsky AE, Khlebus AS, Tsyrlin MI. Evaluation of flexible rail rigidity and stress-strain state of elements of string rail track structure at the uSky center in Sharjah (UAE). *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):45-62. doi: 10.17816/transsyst20228345-62

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

УДК [UDC] 538.955

DOI 10.17816/transsyst20228363-77

© И.В. Мартиросян<sup>1,2,3</sup>, С.В. Покровский<sup>1,2,3</sup>, М.А. Осипов<sup>1,2</sup>,  
А.С. Стариковский<sup>1,2</sup>, И.А. Руднев<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(Москва, Россия)

<sup>2</sup>Университет «Сириус»  
(Сириус, Краснодарский край, Россия)

<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет  
(Казань, Россия)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ, РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ<sup>1</sup>

**Цель:** моделирование динамических характеристик магнито-левитационной платформы на основе высокотемпературного сверхпроводника в процессе движения, разгона и торможения.

**Методы:** численный анализ магнитной левитационной системы выполнен методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics.

**Результаты:** при прямолинейном движении поперечные колебания не превышают 15 %, а увеличение скорости и массы подвеса не оказывает существенного влияния на амплитуду вибраций. В случае вертикальных колебаний увеличение массы и скорости платформы приводит к увеличению вибрационной стойкости системы. При увеличении радиуса поворота пути максимальная возможная скорость вхождения в поворот без отрыва подвеса от магнитного трека увеличивается нелинейно.

**Заключение:** разработанная численная модель позволяет прогнозировать динамические характеристики левитационного транспорта и может быть применена для систем различного масштаба.

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

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Университета «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51012, а также научного проекта РФФИ № 20-38-90144 по конкурсу «Аспиранты» (И.В. Мартиросян).

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.V. Martirosian<sup>1,2,3</sup>, S.V. Pokrovskii<sup>1,2,3</sup>, M.A. Osipov<sup>1,2</sup>,  
A.S. Starikovskii<sup>1,2</sup>, I.A. Rudnev<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university MEPhI  
(Moscow, Russia)

<sup>2</sup>Sirius University  
(Sirius, Krasnodar region, Russia)

<sup>3</sup>Kazan Federal University  
(Kazan, Russia)

## SIMULATION OF THE MAGLEV SUSPENSION DYNAMIC CHARACTERISTICS DURING MOVEMENT, ACCELERATION AND DECELERATION

**Background:** When developing high-speed transport systems based on the magnetic levitation phenomenon, it is necessary to take into account a huge number of factors that affect the characteristics and stability of this type systems. One of the simplest and most convenient methods for achieving these goals is numerical simulation.

**Aim:** simulation of the dynamic characteristics of a magnetic suspension based on a high-temperature superconductor during movement, acceleration and deceleration.

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

**Results:** during straight motion, lateral vibrations do not exceed 15 %, and the suspension speed and mass increase does not have a significant effect on the vibrations amplitude. In the case of vertical oscillations, the platform mass and speed increase leads to an increase in the vibration resistance of the system. With an increase in the turning radius of the track, the maximum possible speed of entering the turn without detaching the suspension from the magnetic track increases non-linearly.

**Conclusion:** The developed numerical model makes it possible to predict the dynamic characteristics of levitation transport and can be applied to systems of various scales.

**Key words:** high-temperature superconductor, magnetic levitation, transport systems, finite element method.

## ВВЕДЕНИЕ

Явление сверхпроводимости открывает уникальные перспективы в области высокоскоростного наземного транспорта. Крупнейшие мировые производители современных сверхпроводящих композитов, или, так называемых, высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (2G ВТСП), работают над созданием концепций поездов на основе явления магнитной левитации, а также над разработкой методов контроля устойчивости систем этого типа. При разработке таких концепций

необходимо учитывать значительное число факторов: колебания, возникающие из-за неоднородности магнитного поля пути, высокие центробежные силы при наличии поворотов пути, электродинамические и механические процессы при разгоне, движении и торможении и т. д. В этой работе мы анализируем некоторые из этих аспектов с помощью методов численного моделирования.

В литературе, посвященной вопросу создания магнитолевитационного транспорта, представлены результаты разнообразных исследований. Так, контроль вертикальных вибраций динамической ВТСП системы, подверженной внешним возмущениям обсуждался и моделировался в работе [1]. Горизонтальные колебания сверхпроводника над кольцевым постоянным магнитом исследовались в работе [2]. Представленная в работе [2] система также предполагает использование ВТСП для космического применения в качестве регулятора вибрационной стойкости. Разработки высокоскоростных транспортных систем на основе явления магнитной левитации, в том числе на основе ВТСП, начали получать широкое распространение более 30 лет назад [3–6]. Первый пилотируемый испытательный поезд на магнитной ВТСП подвеске был создан в Лаборатории прикладной сверхпроводимости (ASCLab) в Юго-западном университете Цзяотун (SWJTU), Китай [7]. После этого учеными из Германии, России, Италии было разработано несколько прототипов. В 2013 году в лаборатории ASCLab было проведено успешное испытание кольцевой магнитной линии под названием «Супер-Маглев», в основе которой заложен массив Хальбаха [8]. Во всех исследованиях отмечалось, что в процессе движения ВТСП подвеса неизбежно возникновение вибраций, которые могут служить угрозой безопасности движения состава [9]. Эти вибрации могут быть обусловлены неоднородностью магнитного поля пути, по которому движется подвес, наличием центробежных сил при повороте, суммарным действием сил электродинамического ускорения и аэродинамического сопротивления.

Данной работой мы начинаем цикл статей, посвященных исследованию динамики ВТСП подвесов, движущихся в неоднородных магнитных полях. Мы начнем с анализа базовых конфигураций, а затем более детально коснемся вопросов стабилизации подвеса и оптимизации его характеристик. В настоящей статье представлены результаты моделирования стопки ВТСП лент разгоняющейся, движущейся и тормозящей в магнитном поле постоянных магнитов. При этом вопрос управления разгоном и торможением на данном этапе не рассматривается, но мы получим первоначальные данные о проблемах, связанных с неоднородностью магнитного поля на прямолинейных участках, поворотах пути и центростремительным ускорением.

## ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Общий концепт магнитолевитационной системы на основе ВТСП композитов представляет из себя ВТСП подвес, движущийся в неоднородном магнитном поле сборки постоянных магнитов (Рис.1). Сборка постоянных магнитов (ПМ) может служить как для вертикальной, так и для латеральной устойчивости магнитолевитационной системы. Вертикальная, или же опорная, сборка может быть представлена в трех вариантах: в виде сонаправленных, встречно направленных магнитов или же магнитной сборки Хальбаха (Рис. 1). Латеральная система, то есть система боковой устойчивости, может быть представлена в виде магнитов, ориентированных горизонтально или вертикально.

В качестве магнитов для вертикальной и латеральной систем использовались NeFeV магниты марки № 42 с остаточной индукцией магнитного поля на поверхности 0,38 Т. В латеральной сборке всегда присутствует лишь по одному магниту с каждой стороны. Количество магнитов в опорной сборке, размеры линейного участка пути, величины радиуса поворота пути являются регулируемыми входными параметрами модели и будут оговорены отдельно для каждого из рассмотренных случаев.

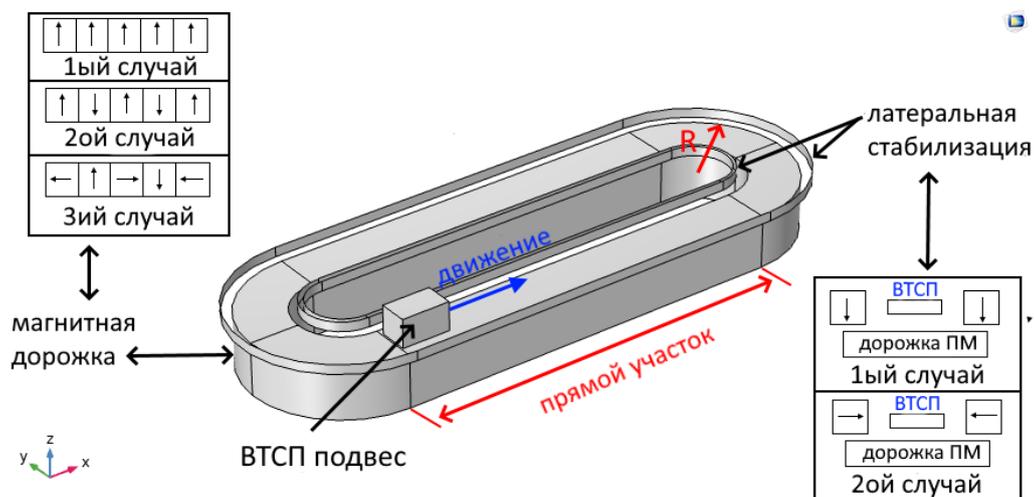


Рис. 1. Общий вид магнитолевитационной системы

В качестве ВТСП элемента на данном этапе будет рассматриваться стопка ВТСП лент. 2G ВТСП ленты имеют слоистую структуру и содержат более 10 слоев [10]. Буферные и защитные слои общей толщины ~120 нм не оказывают существенного влияния на электродинамические и тепловые процессы, рассматриваемые в данной работе, а скорее являются необходимой частью технологического процесса при производстве.

Поэтому в рамках модели они не учитывались. Основные параметры ВТСП лент, использованные при моделировании, соответствуют реальной архитектуре композита и представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Параметры моделируемых ВТСП лент

Наименование	Параметр
Производитель	SupreOx, Россия
Высокотемпературный сверхпроводник	REBCO (где RE- редкоземельный элемент)
Толщина сверхпроводящего слоя	2 мкм
Подложка	Hastelloy C-276
Толщина подложки	50 мкм
Толщина слоя серебра	3 мкм
Толщина слоя меди	30 мкм
Средний критический ток, $I_c$	550 А (77,4 К, собственное поле)
Показатель степени ВАХ	27

Размер каждой ВТСП ленты в стопке составляет 12мм x 20 мм, а их количество является варьируемым параметром. Для того чтобы исследовать влияние массы перевозимого груза на вибрационную стойкость системы, при моделировании над стопкой ВТСП лент располагается сплошной блок размера 12 мм x 20 мм x 1 мм, который предназначен для регулирования массы подвеса и не участвует в электродинамических и тепловых процессах. Так, в рамках данной работы были рассмотрены случаи массы подвеса 50 и 350 г, при этом при изменении массы регулировочного блока, его размер не изменялся, как не менялся бы размер вагона при изменении массы перевозимого груза. Масса подвеса равняется сумме масс ВТСП лент и регулировочного блока. Для каждого слоя ВТСП ленты известны точные размеры и зависимости их плотности от температуры, так что их масса может быть точно определена. Поэтому плотность блока вычисляется как:

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{bulk}}{V_{bulk}} = \frac{m_s - m_{HTS}}{V_{bulk}} \quad (1)$$

где  $\rho_{bulk}$  – плотность материала регулировочного блока,  $m_{bulk}$  и  $V_{bulk}$  – его масса и объем,  $m_s$  – масса подвеса, которая задается равной 50 г или 350 г, а  $m_{HTS}$  – масса стопки ВТСП лент, которая вычисляется как сумма масс всех слоев, для которых объемы и плотности известны. Таким образом, в рамках численной модели задается масса ВТСП платформы, а плотность регулировочного блока вычисляется автоматически для обеспечения необходимой массы подвеса.

## 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 [11, 12], а также для расчета магнитных систем на их основе [13]. В этой постановке задачи прямой решатель среды Comsol Multiphysics использует две статических переменных: магнитное поле  $\mathbf{H}$  и магнитный векторный потенциал  $\mathbf{A}$ . 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  $\mathbf{J}$  в сверхпроводнике:

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

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

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

где  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля,  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля,  $t$  – время,  $\mu_0$  – относительная магнитная проницаемость.

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

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

где  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Вольтамперная характеристика  $\mathbf{E} = \rho \cdot \mathbf{J}$  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  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля,  $\rho$  – 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 ленты, размеры которой 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. Также в рамках модели учитывается зависимость критического тока от магнитного поля [14]. В качестве граничных условий используется условие Дирихле.

### *В. Теплофизическая модель*

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

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

где  $d$  – плотность,  $C_p$  – теплоемкость,  $T$  – температура,  $k$  – теплопроводность,  $Q$  – все источники тепла, включая термоэлектрические,  $\mathbf{u}$  – 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,  $\alpha$  – фитирующий параметр.

В рамках модели предусмотрено безжидкостное охлаждение системы до температуры 77,4 К. Практическая реализация такого охлаждения возможна с применением криокулерной техники. В рамках модели предполагается торцевое охлаждение стопки ВТСП лент по всему ее периметру. Для этого на боковых границах стопки задается условие теплоотвода, мощность которого также зависит от температуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первичные расчеты были посвящены исследованию влияния типа опорной магнитной сборки на вертикальную силу левитации [16]. Расчеты показали, что максимальная левитационная сила достигается при использовании магнитной сборки Хальбаха для стопок лент различной высоты. Однако в этом случае с увеличением левитационного зазора сила левитации уменьшается значительно быстрее, чем в случае сборки магнитов, ориентированных в одном направлении. С подробностями

влияния типа сборки на вертикальную составляющую силы левитации можно ознакомиться в нашей ранней работе [16]. Таким образом, наиболее перспективным для использования в транспортных системах является сборка с согласно или противоположно ориентированными магнитами. Сборка Хальбаха может наиболее успешно применяться в системах с малым зазором левитации, например, в магнитных подшипниках. Опираясь на эти выводы, мы провели расчет движения стопки 50 ВТСП лент в магнитном поле сборки сонаправленных магнитов. Стопка разогналась до скорости 100 км/ч, размерность ускорения 10 м/с. Максимальное сопротивление движению в магнитном поле соответствует началу разгона платформы и достигает ~4 Н (Рис. 2), а затем снижается и принимает типичные значения для латеральной силы при движении в данном магнитном поле. Аэродинамические силы, действующие на подвес, напротив, возрастают с увеличением скорости. Суперпозиция этих двух компонент – электро и аэродинамической – является той силой, которая препятствует движению подвеса вдоль прямого участка магнитного рельса. Соответственно, наиболее просто преодолеть эту силу будет при той скорости, при которой сумма двух описанных вкладов минимальна.

Из приведенного графика следует, что наименьшее суммарное сопротивление движению для данного случая соответствует скорости движения подвеса ~45 км/ч. Как уже говорилось ранее, при моделировании над стопкой ВТСП лент располагается блок, который не участвует в электродинамических и тепловых процессах, а лишь искусственно регулирует массу левитирующего подвеса. Аэродинамическое сопротивление зависит от миделева сечения, то есть наибольшего по площади сечения подвеса поперек направления движения. Но поскольку в рамках модели изменение массы происходит без изменения объема и размеров подвеса, миделево сечение всегда одинаково (число ВТСП лент \* поперечное сечение одной ленты + поперечное сечение массивного блока). Роль массы подвеса становится очевидной при расчете колебаний и при расчете динамики подвеса на поворотах пути.

Для рассмотренного выше случая наблюдается появление и вертикальных и боковых вибраций. Нормированные максимальные амплитуды вертикальных и боковых вибраций для различных скоростей движения подвеса приведены на Рис. 3. Отметим некоторые характерные особенности:

- на прямом участке пути поперечные колебания не превышают 15%. Увеличение скорости подвеса существенно не влияет на величину вибрации;
- увеличение массы подвеса при боковых колебаниях существенно не влияет на поперечное смещение;

- в случае вертикальных колебаний увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний почти вдвое;
- с увеличением скорости движения вертикальная составляющая колебаний сначала насыщается и даже уменьшается на прямом участке пути при большей массе подвеса.

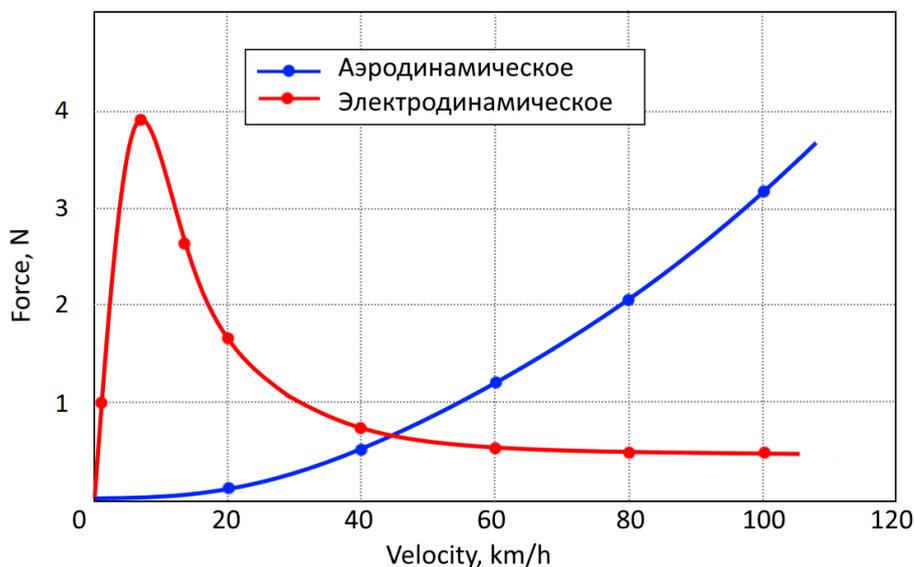


Рис. 2. Зависимости электродинамического и аэродинамического сопротивления подвеса от скорости движения

Фактически, рассчитанные зависимости от скорости отражают и характер поведения подвеса при разгоне и торможении. Так, при торможении подвеса аэродинамическое сопротивление будет уменьшаться, а электродинамические потери при торможении после равноускоренного движения начнут расти.

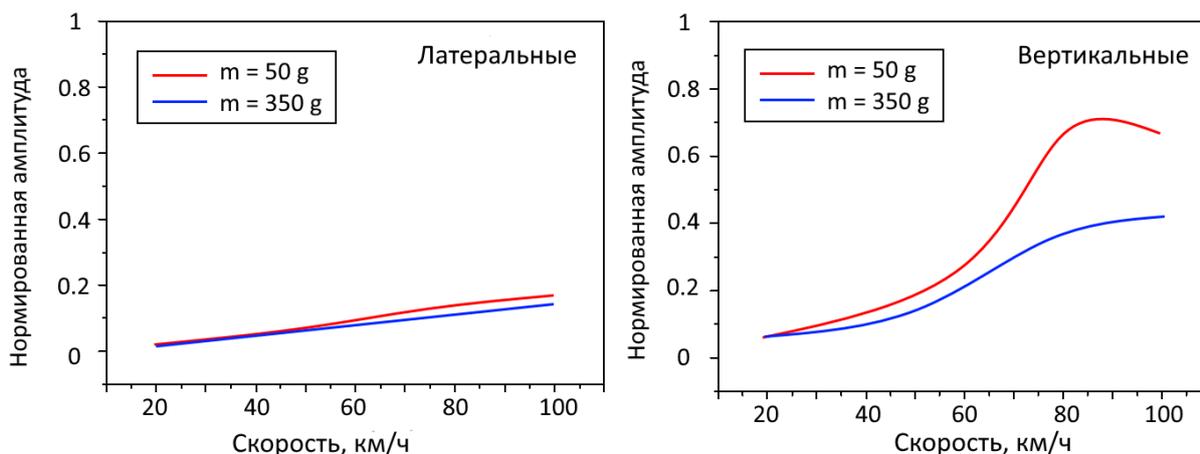


Рис. 3. Зависимости нормированной максимальной амплитуды вибраций ВТСП подвеса от скорости движения для боковых (слева) и вертикальных (справа) вибраций при прямолинейном движении

Таким образом, увеличение массы подвеса положительно влияет на вибрационную стойкость системы, однако ситуация существенно меняется при появлении поворотов пути. Несмотря на то, что при прямолинейном движении увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний, при движении по криволинейной траектории из-за наличия центробежных сил более легкий подвес может разогнаться до более высоких скоростей. Если центробежная сила превышает максимальную боковую силу, то подвес оторвется от магнитного рельса. Так, магнитная платформа массой 350 г может войти в поворот радиусом 10 см на максимальной скорости  $< 1$  км/ч, тогда как при массе подвеса 50 г максимальная скорость при повороте составляет уже 2,5 км/ч (Рис. 4).

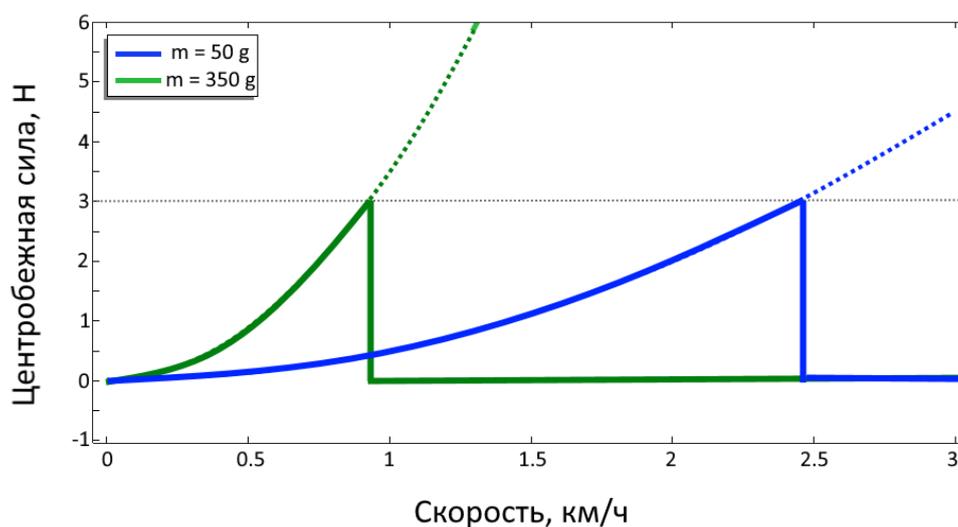


Рис. 4. Зависимости центробежной силы от скорости движения подвеса на повороте радиуса 10 см

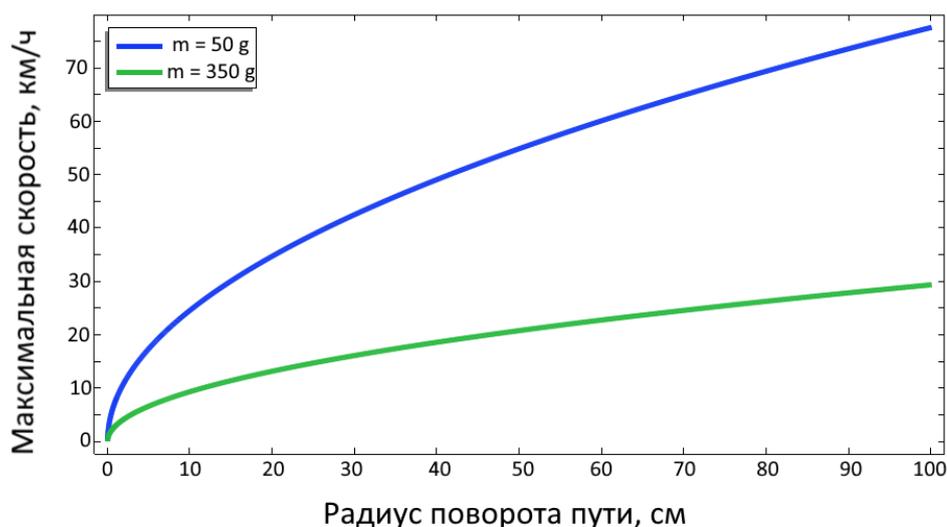


Рис. 5. Зависимости максимальной скорости подвеса от радиуса поворота магнитного пути

Зависимость максимальной скорости движения подвеса от радиуса поворота пути приведена на Рис. 5. Зависимость носит нелинейный характер, и для более легкого подвеса характерны более высокие скорости вхождения в поворот.

Кроме того, при движении на повороте пути величина и градиент магнитного поля по внутреннему и внешнему радиусу магнитной дорожки существенно различаются. На Рис. 6 в качестве примера приведено распределение магнитного поля для внешнего и внутреннего радиуса магнитного пути, состоящего из 10мм x 10мм x 10мм постоянных магнитов. Можно увидеть, что амплитуда поля по внешнему радиусу может отличаться на 30–60 % от амплитуды поля по внутреннему и неоднородность поля вдоль внешнего радиуса значительно выше.

Таким образом, мы предполагаем, что колебания подвеса по внешнему радиусу будут значительно сильнее, чем по внутреннему. Подвес будет отклоняться от горизонтального положения, причем амплитуда и частота вибраций будет различаться для двух сторон левитирующей платформы, находящихся на разных сторонах магнитного трека. Анализ поведения положения подвеса при поворотах магнитного пути и методам его стабилизации будет посвящена следующая работа цикла.

## 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. Выполнен расчет вертикальных и поперечных колебаний при прямолинейном движении, также выполнен расчет электродинамического и аэродинамического сопротивления подвеса в процессе разгона. Проведен расчет максимально возможной скорости подвеса при наличии поворотов магнитной дорожки с учетом воздействия на систему центробежных сил, получены зависимости максимальной скорости подвеса от радиуса поворота пути. По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

– При прямолинейном движении необходимо учитывать баланс между электродинамическим и аэродинамическим сопротивлением. Для рассматриваемой системы наименьшее энергопотребление требуется для поддержания скорости ~45 км / ч.

– На прямом участке пути амплитуда поперечных колебаний не превышает 15 % от начального положения стопки ВТСП лент. Увеличение скорости подвеса существенно не влияет на величину вибрации.

Увеличение массы подвеса при боковых колебаниях существенно не влияет на поперечное смещение при прямолинейном движении.

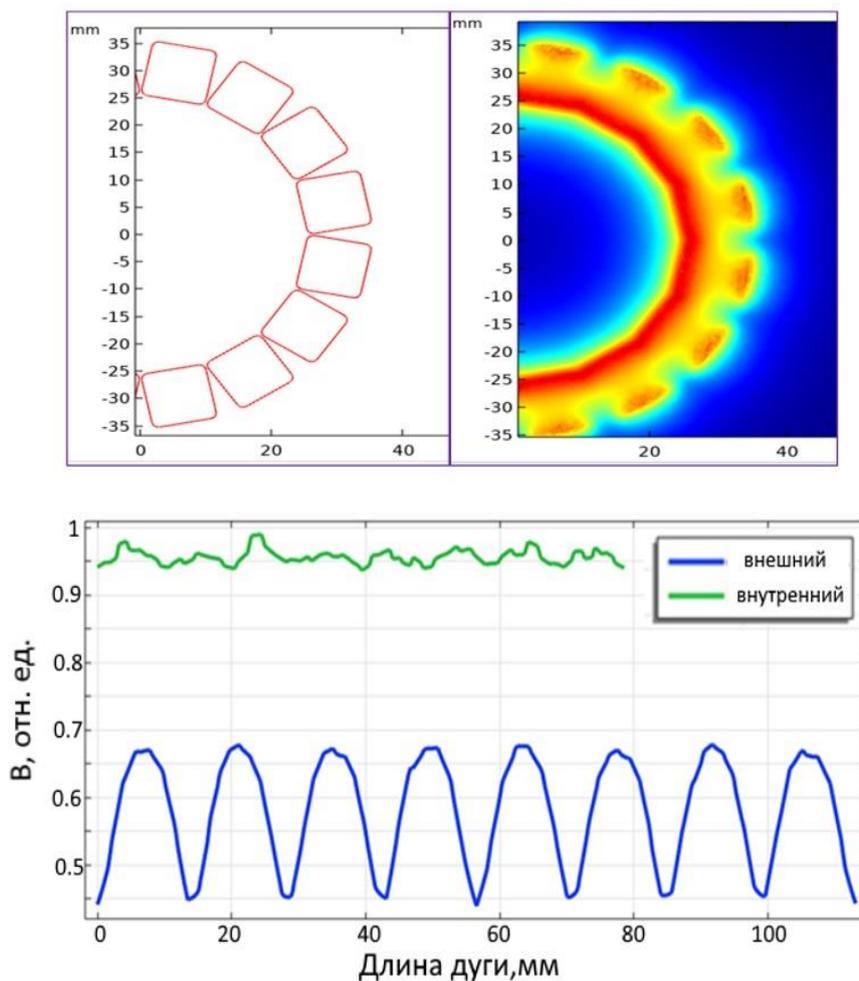


Рис. 6. Нормированные распределения магнитного поля на высоте 1 мм от магнитной дорожки, состоящей из одного ряда магнитов 10x10x10 мм по внешнему и по внутреннему радиусам

– В случае вертикальных колебаний при прямолинейном движении увеличение массы подвеса приводит к уменьшению амплитуды колебаний почти вдвое. С увеличением скорости движения вертикальная составляющая колебаний насыщается и даже уменьшается на прямом участке пути.

– Зависимости колебаний от скорости являются характерными, как для разгона, так и для процесса торможения. То есть при уменьшении скорости зависимости примут вид зеркальный тому, который характерен для разгона.

– При криволинейном движении, если центробежная сила превышает максимальную боковую силу, то подвес оторвется от магнитного рельса. Так, магнитный подвес массой 350 г может войти в поворот радиусом

10 см на максимальной скорости  $< 1$  км/ч, тогда как при массе подвеса 50 г максимальная скорость при повороте составляет уже 2,5 км/ч. При увеличении радиуса поворота пути максимальная возможная скорость вхождения в поворот без отрыва от магнитного трека нелинейно увеличивается.

Таким образом, увеличение массы и скорости левитирующей ВТСП платформы в общем положительно сказывается на вибрационной стойкости системы при прямолинейном движении, но отрицательно – при движении по траектории с поворотами. Следовательно, существуют оптимальные параметры массы и скорости, необходимые для наиболее устойчивого движения подвеса вдоль магнитного трека с известными радиусами поворота пути. Кроме того, для увеличения эффективности систем разгона и торможения магнитолевитационного транспорта необходимо производить учет в совокупности электродинамических и аэродинамических сил.

#### 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. Nagaya K, Tsukagoshi M, Kosugi Y, Murakami M. VIBRATION CONTROL FOR A HIGH-T<sub>c</sub> SUPERCONDUCTING NON-LINEAR LEVITATION SYSTEM. J SOUND VIB. 1997;208(2):299-311. doi:10.1006/jsvi.1997.1223
2. Jang-Horng Y, Postrekhin E, Ki Bui M, et al. Vibration isolation for space structures using HTS-magnet interaction. IEEE T APPL SUPERCON. 1999;9(2):908-10. doi:10.1109/77.783444
3. Brandt EH. Levitation in Physics. Science. 1989;243(4889):349-55. doi:10.1126/science.243.4889.349
4. Moon FC. Superconducting Levitation: Applications to Bearing & Magnetic Transportation 1994 August 01, 1994. 310 p. Available from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994slab.book.....M/>
5. Ma K, Postrekhin YV, Chu W-K. Superconductor and magnet levitation devices. REV SCI INSTRUM. 2003;74:4989-5017. doi:10.1063/1.1622973
6. Hull JR. Superconducting bearings. SUPERCOND SCI TECH (Online). 2000;13(2):R1-R15. doi:https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/2/201
7. 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
8. 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
9. Li H, Deng Z, Ke Z, et al. Curve Negotiation Performance of High-Temperature Superconducting Maglev Based on Guidance Force Experiments and Dynamic Simulations. IEEE T APPL SUPERCON. 2020;30(1):1-11.

- doi:10.1109/TASC.2019.2932283
10. Lee S, Petrykin V, Molodyk A, Samoilenkov SV, 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. Dular P, Remacle J, Henrotte F, et al. Magnetostatic and magnetodynamic mixed formulations compared with conventional formulations. IEEE T MAGN. 1997;33(2):1302-5. doi:10.1109/20.582494
  12. Bíró O. Edge element formulations of eddy current problems. COMPUT METHOD APPL M. 1999;169(3):391-405. doi:https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00165-0
  13. Bortot L, Auchmann B, Garcia IC, et al. A Coupled A–H Formulation for Magneto-Thermal Transients in High-Temperature Superconducting Magnets. IEEE T APPL SUPERCON. 2020;30(5):1-11. doi:10.1109/TASC.2020.2969476
  14. Strickland N, Wimbush S. The magnetic-field dependence of the critical current: what we really need to know. IEEE T APPL SUPERCON. 2016;PP:1. doi:10.1109/TASC.2016.2636561
  15. Zhang M, Matsuda K, Coombs TA. New application of temperature-dependent modelling of high temperature superconductors: Quench propagation and pulse magnetization. JPN J APPL PHYS. 2012;112(4):043912. doi:10.1063/1.4747925
  16. Anischcenko I, Pokrovskii S, Rudnev I, Osipov M. Modeling of magnetization and levitation force of HTS tapes in magnetic fields of complex configurations. SUPERCOND SCI TECH. 2019;32(10):105001. doi:10.1088/1361-6668/ab2bbe

**Сведения об авторах:**

**Мартirosян Ирина Валерьевна**, инженер;  
eLibrary SPIN:3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;  
E-mail: mephizic@gmail.com

**Покровский Сергей Владимирович**, кандидат физико-математических наук, ассистент;

eLibrary SPIN:6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;  
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

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

**Стариковский Александр Сергеевич**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID0000-0002-7605-7578;  
E-mail: sannyok1995@gmail.com

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

**Information about the authors:**

**Irina V. Martirosian**, engineer;  
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;  
E-mail: mephizic@gmail.com

**Sergey V. Pokrovskii**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant;  
eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;  
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

**Maxim A. Osipov**, engineer;

eLibrary SPIN: 4776-7939; ORCID: 0000-0002-8981-5606;

E-mail: max.vfk@gmail.com

**Alexander S. Starikovskii**, Graduate;

eLibrary SPIN: 9493-3256; ORCID0000-0002-7605-7578;

E-mail: sannyok1995@gmail.com

**Igor A. Rudnev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;

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. Моделирование динамических характеристик магнитолевитационной транспортной платформы в процессе движения, разгона и торможения // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 63–77. doi: 10.17816/transsyst20228363-77

### **To cite this article:**

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. doi: 10.17816/transsyst20228363-77

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

УДК [UDC] 621.313.333  
DOI 10.17816/transsyst20228378-88

© В.А. Соломин, А.В. Соломин, М.Ю. Колмыкова, А.А. Чехова  
Ростовский государственный университет путей сообщения  
(Ростов-на-Дону, Россия)

## ТОРМОЗНЫЕ УСИЛИЯ ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

**Обоснование:** Исследования свойств линейных тяговых приводов для новых видов подвижного состава представляется актуальной задачей. Линейные двигатели многофункциональны и способны обеспечивать как тягу, так и торможение перспективного высокоскоростного подвижного состава.

**Цель:** Исследование тормозных характеристик регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента.

**Методы:** Аналитическими методами получены соотношения для расчета тормозных сил регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента.

**Результаты:** Полученные соотношения позволили выполнить расчеты тормозных сил линейных асинхронных двигателей.

**Заключение:** Результаты расчета тормозных усилий регулируемых линейных асинхронных двигателей позволяют обоснованно выбирать режимы торможения нового вида подвижного состава.

**Ключевые слова:** новый вид подвижного состава, регулируемый линейный асинхронный двигатель, схемы замещения, тормозные усилия, вытеснение тока в пазу.

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

© V.A. Solomin, A.V. Solomin, M.Yu. Kolmykov, A.A. Chekhov  
Rostov State Transport University  
(Rostov-on-Don, Russia)

## BRAKING FORCES OF A TRACTION LINEAR INDUCTION MOTOR WITH AN ADJUSTABLE RESISTANCE OF A SHORT- CIRCUITE WINDING OF THE SECONDARY ELEMENT

**Background:** The study of the properties of linear traction drives for new types of rolling stock seems to be an urgent task. Linear motors are multifunctional and are capable of providing both traction and braking of promising high-speed rolling stock.

**Aim:** Investigation of the braking characteristics of an adjustable traction linear induction motor with variable resistance by a short-circuited winding of the secondary element.

**Methods:** Analytical methods have been used to obtain relations for calculating the braking forces of an adjustable linear induction motor with a short-circuited winding of the secondary element.

**Results:** The obtained ratios made it possible to calculate the braking forces of linear induction motors.

**Conclusion:** The results of calculating the braking forces of adjustable linear induction motors make it possible to reasonably choose the braking modes of a new type of rolling stock.

**Key words:** new type of rolling stock, adjustable linear induction motor, equivalent circuits, braking forces, current displacement in the slot.

## ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование транспортных коммуникаций имеет большое значение для развития современного общества. Свою заметную роль в этой области играют принципиально новые виды транспорта, способные перемещать на большие расстояния с высокими скоростями людей и различные грузы. Магнитолевитационный транспорт (МЛТ) развивает скорости бесконтактного с путевой структурой движения экипажей в диапазоне 350-500 км/ч. Скорость движения свыше 1000 км/ч могут быть достигнуты при использовании вакуумного магнитолевитационного транспорта (ВМЛТ). Заметный вклад в развитие магнитолевитационного транспорта внесли ученые Петербургского государственного университета путей сообщения. В качестве приводных электрических машин систем МЛТ и ВМЛТ используются линейные тяговые двигатели, преобразующие электроэнергию непосредственно в поступательное перемещение. Линейные тяговые двигатели для магнитолевитационного транспорта и ВМЛТ бывают синхронными и асинхронными. На нынешнем этапе развития техники и технологий многие инженеры и ученые полагают, что линейные асинхронные двигатели (ЛАД) имеют хорошие перспективы для МЛТ и ВМЛТ, так как системы торможения высокоскоростных поездов оказываются более эффективными. Одним из достоинств тягового ЛАД является их простота по сравнению с линейными синхронными двигателями. Новый вид линейных асинхронных двигателей с регулируемым сопротивлением короткозамкнутых обмоток вторичных элементов (ВЭ) для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта обеспечивает улучшение их пусковых, тормозных и регулировочных характеристик.

Конструкция нового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением отличается выполнением электропроводящей части ВЭ в виде короткозамкнутой обмотки, стержни

которой представляют собой изолированные проводники, уложенные один над другим по высоте паза, что схематично представлено на Рис. 1. Проводники стержней замыкаются с одной из сторон при помощи электропроводящей шины, а с другой – подвижным элементом, который может перемещаться как снизу вверх, так и сверху вниз по высоте паза. Данное обстоятельство позволяет замыкать проводники стержней поочередно, регулируя при этом механические усилия и скорость движения ЛАД. При перемещении подвижного элемента изменяется «активная площадь» паза, по которой протекает ток, взаимодействующий с бегущим магнитным полем, соответственно, изменяются и параметры вторичного элемента ЛАД. Рассматриваемый линейный асинхронный двигатель в значительной мере аналогичен асинхронному двигателю с фазной обмоткой ротора.

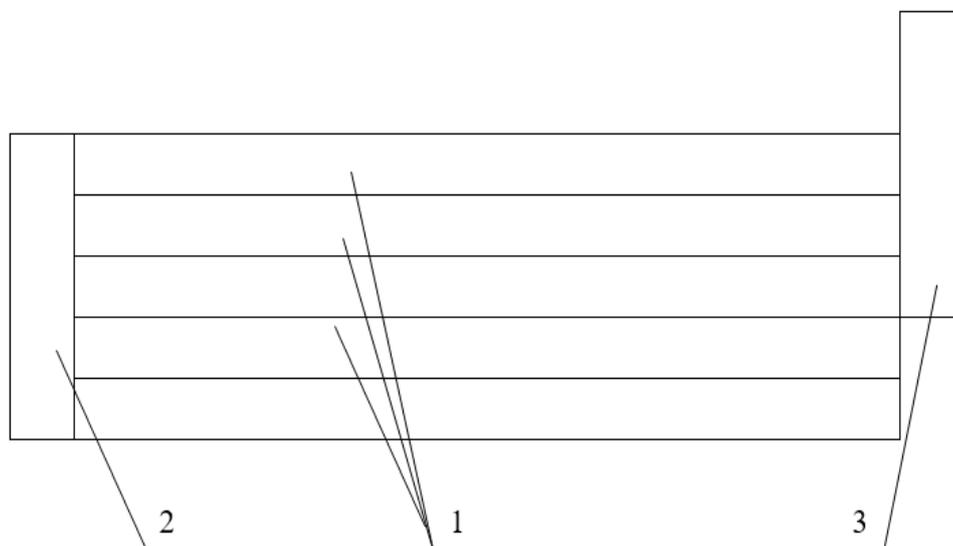


Рис. 1. Фрагмент обмотки вторичного элемента линейного асинхронного двигателя:  
1 – отдельный проводник; 2 – электропроводящая шина; 3 – перемещаемый элемент

Представленная работа посвящена рассмотрению особенностей торможения противовключением тягового ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЛАД

Использование схем замещения для определения характеристик и анализа режимов работы асинхронных машин широко применяется в электромеханике [1–7]. Применение детализированных схем замещения позволяет повысить точность расчета линейных асинхронных двигателей [8]. Для анализа процессов ЛАД, определение параметров и характеристик двигателя применяют схемы замещения и ряд других исследований [9].

В системах магнитолевитационного транспорта при исследовании процессов в тяговых линейных асинхронных двигателях следует учитывать и влияние магнитных полей подвеса экипажа на характеристики ЛАД. Так как магнитная система ЛАД не насыщена, то потерями мощности на гистерезис и вихревыми токами пренебрегают. Для дальнейшего получения расчетных значений тормозных усилий можно использовать схему замещения регулируемого ЛАД с вынесенным контуром намагничивания (Рис. 2).

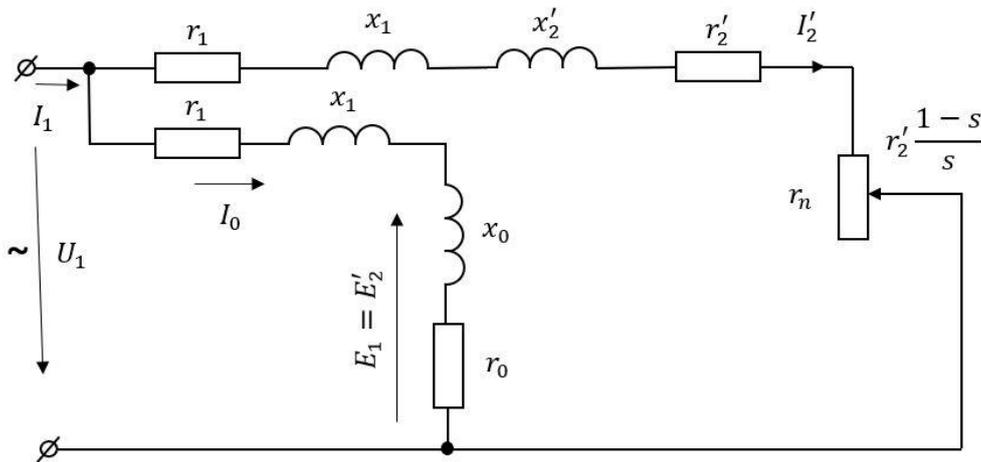


Рис. 2. Схема замещения фазы регулируемого ЛАД с вынесенным контуром намагничивания

На Рис. 1 обозначено:  $r_1$ ,  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки индуктора линейного асинхронного двигателя;  $r_2'$ ,  $x_2'$  – приведенные к индуктору активное и индуктивное сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента (эти сопротивления изменяют свои значения при регулировании);  $r_0$  – активное сопротивление, учитывающее магнитные потери;  $x_0$  – главное индуктивное сопротивление, обусловленное взаимной индуктивностью обмоток индуктора и вторичного элемента ЛАД.

В тормозной режим методом противовключения ЛАД переходит без применения специальной аппаратуры. Схема управления ЛАД должна содержать устройство для изменения порядка следования фаз, обеспечивающее реверсирование. Тормозное усилие ЛАД в режиме противовключения зависит от величины скольжения, которое превышает единицу. При больших скольжениях частота электродвижущей силы (ЭДС) и тока во вторичном элементе, индуктированного бегущим магнитным потоком, возрастает до таких значений, что становится необходимым учет влияния поверхностного эффекта (вытеснения тока) при определении параметров обмотки ВЭ. Торможение противовключением может быть рассмотрено как логическое продолжение

двигательного режима в область скольжения, превышающих единицу. В связи с этим для расчета тормозных характеристик линейного электродвигателя может быть использована схема замещения, представленная на (Рис. 2).

### ТОРМОЗНЫЕ УСИЛИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЛАД В РЕЖИМЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ

При использовании схем замещения регулируемого линейного асинхронного двигателя (Рис. 2) получено соотношение для расчета тормозных усилий в режиме противовключения.

$$F_{\text{Торм}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot p}{2\tau f [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]}, \quad (1)$$

где  $m_1$  – число фаз индуктора;

$U_1$  – фазное напряжение индуктора;

$\tau$  – полюсное деление ЛАД;

$f$  – частота тока;

$r_1$  – активное сопротивление фазы обмотки индуктора;

$x_1$  – индуктивное сопротивление фазы обмотки индуктора;

$r_2'$  – приведенное активное сопротивление вторичного элемента;

$x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление обмотки вторичного элемента;

$s$  – скольжение,

$p$  – число пар полюсов.

Заметим, что (1) не учитывает влияние вытеснения тока в пазу короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД.

На процесс торможения тягового ЛАД с регулируемым сопротивлением обмотки вторичного элемента будет оказывать влияние конструкция ВЭ (Рис. 3) Сопротивление короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД изменяется при перемещении подвижного электропроводящего замыкающего элемента. Рассмотрим два варианта конструкции стержня короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя (Рис. 3) Первый вариант – стержень обмотки ВЭ образован рядом изолированных проводников, расположенных один над другим по высоте паза (Рис. 3а); второй – стержень выполнен сплошным (Рис. 3б).

На Рис. 3  $\alpha$  – коэффициент, определяемый отношением замкнутой подвижным элементом площади паза к полной площади паза, варьирующийся от 1 до 0,4 (для рассматриваемого случая). При определении тормозного усилия регулируемого ЛАД, у которого стержни короткозамкнутой обмотки вторичного элемента выполнены из отдельных изолированных проводников (Рис. 3а), учет влияния вытеснения тока в пазу необязателен, и расчет производится по формуле (1).

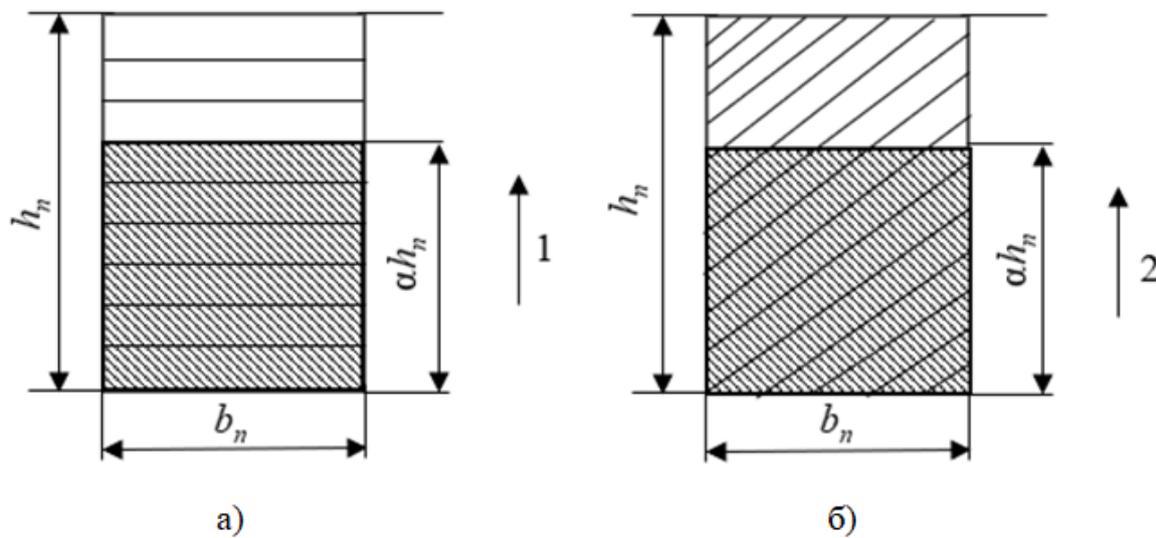


Рис. 3. Паз вторичного элемента регулируемого ЛАД

1, 2 – направление перемещения замыкающего элемента;  $h_n$  – высота паза;  $b_n$  – ширина паза;  $\alpha h_n$  – площадь замкнутой части стержня вторичного элемента (заштрихована)

В том случае, если стержни обмотки ВЭ выполнены сплошными (Рис. 3б), влияние вытеснения тока в пазу обмотки ВЭ необходимо учитывать в расчетах. Тогда тормозное усилие определяется соотношением

$$F_{\text{Торм}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \varphi(\xi) \cdot \frac{r_2}{s}}{2\tau f [(r_1 + \varphi(\xi) \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + \lambda(\xi)x_2')^2]} \quad (2)$$

где  $\varphi(\xi)$  – коэффициент увеличения активного сопротивления обмотки вторичного элемента;

$\lambda(\xi)$  – коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления обмотки вторичного элемента.

Полагаем, что при торможении регулируемого линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента  $U_1 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ .

Введем обозначение

$$C = \frac{m_1 p U_1}{2\tau f} = const. \quad (3)$$

Вводя коэффициент «С» в формулу (1), получим тормозное усилие для варианта (Рис. 3а)

$$F_{Торм} = \frac{C \cdot r_2'}{s} \cdot \frac{1}{(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (4)$$

Соотношение для расчета тормозного усилия регулируемого ЛАД при учете влияния вытеснения тока в пазу обмотки ВЭ для варианта (Рис. 3б).

$$F_{Торм} = \frac{C \cdot \varphi(\xi) \cdot r_2'}{(r_1 + \varphi(\xi) \cdot r_2')^2 + (x_1 + \lambda(\xi) \cdot x_2')^2}. \quad (5)$$

Рассмотрим примеры расчета тормозного усилия регулируемого линейного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента, имеющего следующие данные  $P_H = 13$  кВт;  $2p = 4$ ;  $f = 50$  Гц;  $U_1 = 220$  В,  $\tau = 0,1445$  м;  $l_s = 0,123$  м;  $r_1 = 0,36$  Ом;  $r_2' = 5,4 \cdot 10^{-5}$  Ом;  $x_1 = 0,955$  Ом;  $x_2' = 0,94$  Ом.

Выполним расчет тормозных усилий регулируемого ЛАД без учета влияния вытеснения тока в пазу обмотки вторичного элемента (Рис. 3а). Тормозные усилия рассчитаны при варьировании коэффициента  $\alpha$  от 1,0 до 0,4 для всего диапазона скольжений при торможении регулируемого ЛАД противовключением.

Определим значения тормозных усилий регулируемого линейного асинхронного двигателя с учетом вытеснения тока в пазу обмотки вторичного элемента (Рис. 3б) при варьировании  $\alpha$ . Значения коэффициентов увеличения активного  $\lambda(\xi)$  сопротивления приняты на основании результатов, представленных в [10]. Расчеты выполнены по формуле (5).

На Рис. 4 и Рис. 5 представлены графически результаты расчета тормозных усилий ЛАД в режиме противовключения при различном замыкании площади паза для короткозамкнутой обмотки, стержни которой набраны из изолированных проводников и выполнены сплошными соответственно. Видно, что наибольшее значение тормозного усилия развивает регулируемый линейный асинхронный двигатель, стержни короткозамкнутой обмотки которого не разделены на отдельные изолированные друг от друга проводники.

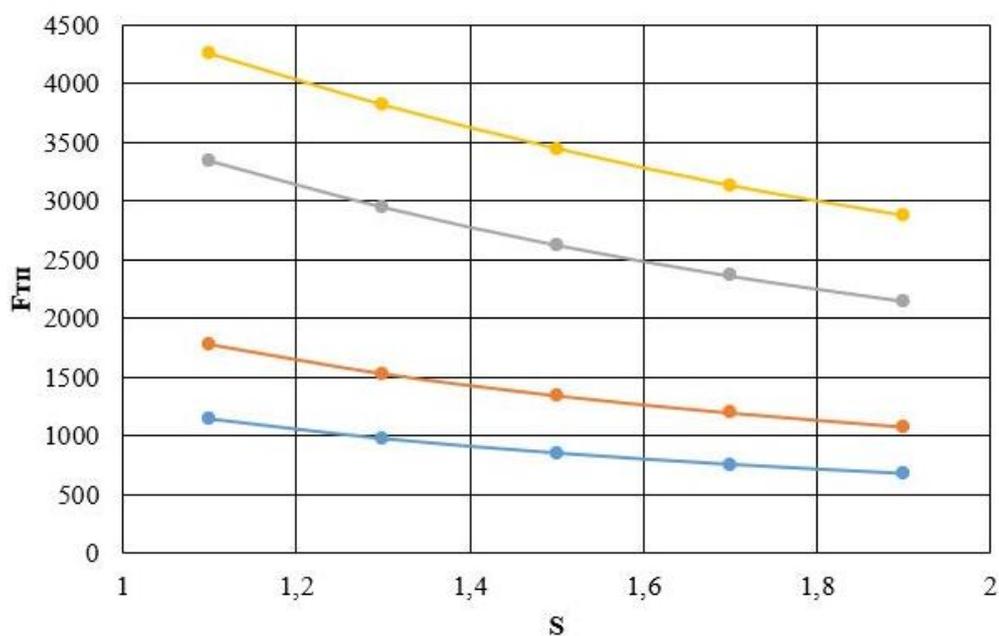


Рис. 4. Тормозные усилия ЛАД без учета вытеснения тока

- тормозное усилие при  $\alpha=0,4$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=0,6$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=0,8$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=1$

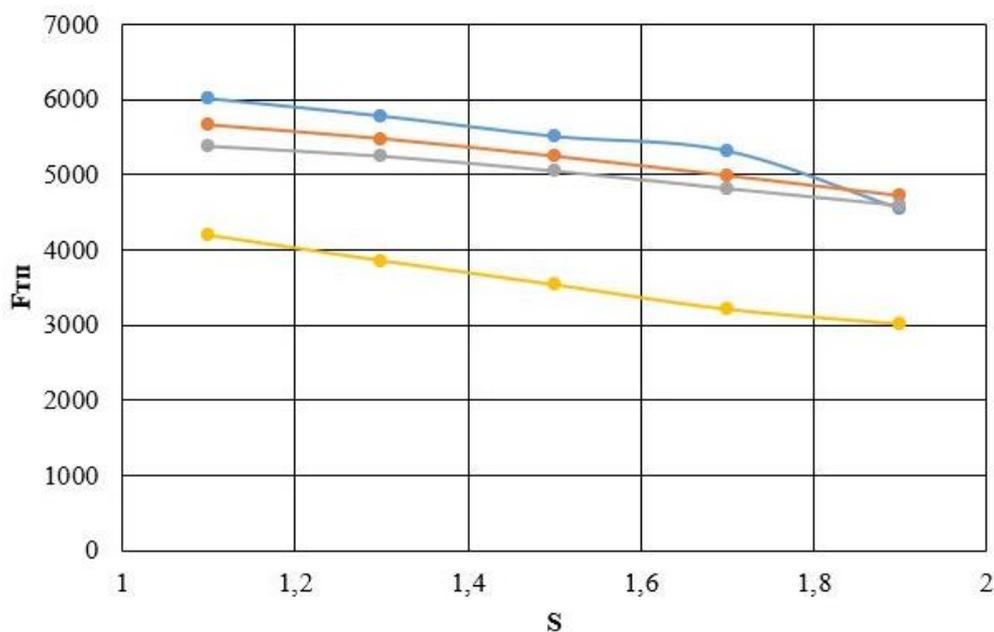


Рис. 5. Тормозные усилия ЛАД с учетом вытеснения тока

- тормозное усилие при  $\alpha=0,4$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=0,6$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=0,8$ ;
- тормозное усилие при  $\alpha=1$

Торможение высокоскоростного магнитолевитационного транспорта – сложный процесс, включающий в себя много различных факторов и аспектов. Определение тормозных усилий, развиваемых регулируемым линейным асинхронным двигателем, работающим в режиме противовключения, является одним из этапов тормозного расчета высокоскоростного МЛТ. Заметим, что конструкция рассматриваемого регулируемого ЛАД способна образовывать короткозамкнутую обмотку вторичного элемента только в пределах активной длины индуктора. За пределами индуктора стержни обмотки ВЭ разомкнуты и в них нет тока, поэтому влияние продольного краевого эффекта не учитывалось.

## ВЫВОДЫ

1. Получены соотношения для расчета тормозных усилий тягового регулируемого линейного асинхронного двигателя, предназначенного для магнитолевитационного транспорта.
2. Установлено, что наиболее эффективным торможение экипажа МЛТ будет при работе регулируемого тягового ЛАД в режиме противовключения, если стержни короткозамкнутой обмотки его вторичного элемента будут выполнены сплошными

### 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. Костенко М.П, Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия, часть 2, 1973. [Kostenko MP, Piotrovskiy LM. *Elektricheskiye mashiny*. Leningrad: Energiya; 1973. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.07.2022. Доступно по: <https://bookree.org/reader?file=652790>
2. Вольдек А.И. Электрические машины (монография). – Л.: Энергия, 1978. [Vol'dek AI. *Elektricheskiye mashiny* (monografiya). Leningrad: Energiya; 1978. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.07.2022. Доступно по: [https://www.studmed.ru/view/voldek-ai-elektricheskie-mashiny\\_2c65ef977a1.html](https://www.studmed.ru/view/voldek-ai-elektricheskie-mashiny_2c65ef977a1.html)
3. Винокуров В.А., Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1986. [Vinokurov VA, Popov DA. *Elektricheskiye mashiny zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: Transport; 1986. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 27.07.2022. Доступно по: [https://www.studmed.ru/vinokurov-a-popov-da-elektricheskie-mashiny-zheleznodorozhnogo-transporta\\_7d63ea3eaf8.html](https://www.studmed.ru/vinokurov-a-popov-da-elektricheskie-mashiny-zheleznodorozhnogo-transporta_7d63ea3eaf8.html)
4. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. [Veselovskiy ON, Konyayev AYu, Sarapulov FN. *Lineynyye asinkhronnyye dvigateli*. Moscow: Energoatomizdat; 1991.

- (In Russ)]. Ссылка активна на: 28.07.2022. Доступно по: <http://nauchkniga.com/nk/index.php?action=bookInfo&id=69266>
5. Сарапулов Ф.Н., Бегалов В.А., Иваницкий С.В. Исследование короткозамкнутого линейного асинхронного двигателя с разомкнутым магнитопроводом // *Электричество*. – 1982. – № 5. – С. 30–34. [Sarapulov FN, Begalov VA, Ivanitskiy SV. Issledovaniye korotkozamknutogo lineynogo asinkhronnogo dvigatelya s razomknyutym magnitoprovodom. *Elektrichestvo*. 1982;(5):30-34. (In Russ.)].
  6. Сарапулов Ф.Н. Расчет режима короткого замыкания индукционного двигателя на основе магнитной схемы замещения // *Электричество*. – 1976. – № 6. – С. 56–58. [Sarapulov FN. Raschet rezhima korotkogo замыкaniya induktsionnogo dvigatelya na osnove magnitnoy skhemy zameshcheniya. *Elektrichestvo*. 1976;(6):56-58. (In Russ.)].
  7. Елифанов А.П., Лебедев А.М., Талья И.И. Повышение эффективности тягового линейного асинхронного привода // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1990. – № 7. – С. 60–67. [Erfanov AP, Lebedev AM, Tal'ya II. Povysheniye effektivnosti tyagovogo lineynogo asinkhronnogo privoda. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 1990;(7):60-67. (In Russ.)].
  8. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТИ – УПИ, 2001. [Sarapulov FN, Sarapulov SF, Shimchak P. *Matematicheskiye modeli lineynykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameshcheniya*. Yekaterinburg: GOU VPO UGTI – UPI; 2001. (In Russ)]. Ссылка активна на: 28.07.2022. Доступно по: <https://bookree.org/reader?file=813029&pg=2>
  9. Hellinger R, Mnich P. Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE*. 2009;97(11):1892-1900.
  10. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель // *Электротехника*. – 2004. – № 12. – С. 31–34. [Solomin AV. Reguliruyemyy lineynyy asinkhronnyy dvigatel'. *Elektrotekhnika*. 2004;(12):31-34. (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

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

**Соломин Андрей Владимирович**, доктор технических наук, доцент;  
eLibrary SPIN:7805-9636; ORCID: 0000-0002-2549-4663;  
E-mail: [vag@kaf.rgups.ru](mailto:vag@kaf.rgups.ru)

**Колмыкова Мария Юрьевна**, аспирант;  
ORCID: 0000-0002-6087-8910;  
E-mail: [vag@kaf.rgups.ru](mailto:vag@kaf.rgups.ru)

**Чехова Анастасия Алановна**, аспирант;  
eLibrary SPIN: 8201-7660; ORCID: 0000-0002-3410-3687;  
E-mail: [ema@rgups.ru](mailto:ema@rgups.ru)

#### Information about the authors:

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

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

**Maria Yu. Kolmykova**, Graduate;

ORCID: 0000-0002-6087-8910;

E-mail: vag@kaf.rgups.ru

**Anastasia A. Chekhova**, Graduate;

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

E-mail: ema@rgups.ru

**Цитировать:**

Соломин В.А., Соломин А.В., Колмыкова М.Ю., Чехова А.А. Тормозные усилия тягового линейного асинхронного двигателя с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 78–88. doi: 10.17816/transsyst20228378-88

**To cite this article:**

Solomin VA, Solomin AV, Kolmykov MYu, Chekhova AA. Braking forces of a traction linear induction motor with an adjustable resistance of a short-circuited winding of the secondary element. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):78-88. doi: 10.17816/transsyst20228378-88

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

УДК [UDC] 519.876.5  
DOI 10.17816/transsyst20228389-104

© **А.В. Шандыбин**

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Обоснование:** Транспортный электротехнический комплекс включает множество взаимосвязанных компонентов инфраструктуры обеспечивающих безопасность функционирования всей системы. Вопросы защиты от электромагнитных влияний становятся все актуальнее с ростом интенсивности перевозок.

**Цель:** Оценка степени электромагнитного воздействия тяговых сетей на кабельную линию.

**Материалы и методы:** Производится математическое моделирование с применением метода конечных элементов и программного пакета COMSOL Multiphysics.

**Результаты:** Получены распределения токов в двух типовых сетях тягового питания с учетом наличия в зоне влияния кабельной линии. Определены порождаемые электрические и магнитные поля и параметры наводимого на оболочку кабельной линии тока.

**Заключение:** Применение математического моделирования позволяет разложить влияния на составляющие факторы и раскрыть внутреннюю структуру механизма взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса. Результаты моделирования позволяют уверенно фиксировать на оболочке кабеля наведенные токи от силовых электромагнитных полей. Данные исследования могут быть использованы при разработке современных средств защиты.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, численные методы, электромагнитные влияния, математическое моделирование.

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

© **A.V. Shandybin**

Rostov State Transport University  
(Rostov-on-Don, Russia)

## THE SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION OF THE COMPONENTS OF TRANSPORT ELECTROTECHNICAL COMPLEX

**Background:** The transport electrical complex includes many interconnected infrastructure components that ensure the safety of the operation of the entire system. The issues of protection against electromagnetic influences are becoming more relevant with the growth of traffic intensity.

**Aim:** Evaluation of the degree of electromagnetic impact of traction networks on the cable line.

**Materials and Methods:** Mathematical modeling is carried out using the finite element method and the COMSOL Multiphysics software package.

**Results:** Current distributions in two typical traction power networks are obtained, taking into account the presence of a cable line in the zone of influence. The generated electric and magnetic fields and the parameters of the current induced on the sheath of the cable line are determined.

**Conclusion:** The use of mathematical modeling makes it possible to decompose the influences into constituent factors and reveal the internal structure of the mechanism of interaction between the components of the transport electrical complex. The simulation results allow us to confidently fix the induced currents from the force electromagnetic fields on the cable sheath. These studies can be used in the development of modern means of protection.

**Key words:** finite element method, numerical methods, electromagnetic influences, math modeling.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди компонентов электротехнических комплексов железнодорожного транспорта тяговая сеть является основным источником электромагнитных влияний на все смежные системы и линии коммуникаций [1]. Значительная протяженность железных дорог и возрастающая со временем интенсивность грузоперевозок постепенно осложняют электромагнитную обстановку и делают актуальными вопросы исследования степени влияний электромагнитных полей и разработки современных мер защиты от них [2].

В свою очередь линии коммуникаций, в том числе кабельные, являются важными элементами железнодорожной инфраструктуры, отвечающими как за возможность осуществления перевозок, так и за обеспечение их безопасности.

Исследованию электромагнитных процессов в системах железнодорожного транспорта посвящено множество работ [3–5], что также подтверждает актуальность изучения данных вопросов.

## МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В основе теоретических построений основных параметров влияния электромагнитного излучения на оболочку кабеля положены следующие уравнения Максвелла [6]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t; \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  – напряжённость магнитного поля;  
 $\mathbf{j}$  – плотность электрического тока (тока проводимости);  
 $\mathbf{D}$  – электрическая индукция;  
 $\mathbf{E}$  – напряжённость электрического поля;  
 $\mathbf{B}$  – магнитная индукция.

Уравнения Максвелла (1) необходимо дополнить материальными уравнениями, связывающими напряженности электромагнитного поля с векторами электрического и магнитного смещения (индукции):

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  электрическая и магнитная постоянные.

В зависимости от среды действия электромагнитных полей относительные диэлектрические  $\varepsilon$  и магнитные  $\mu$  проницаемости принимают различные значения. Так для воздуха они близки к единице. Относительная диэлектрическая проницаемость сред обычно лежит в пределах от единицы до сотни, а магнитная проницаемость, в зависимости от способности вещества к намагничиванию, может быть, как больше, так и меньше единицы.

Первое уравнение Максвелла представляет собой закон полного тока и при его использовании необходимо иметь граничные и начальные условия, в общем случае определяющиеся сложными некоординатными поверхностями.

Таковыми условиями описываются влияния сред на границах соприкасающихся элементов в расчетной области, а также взаимодействие с бесконечным пространством вокруг.

Из уравнений для электромагнитных полей (1), для частот близких к промышленной, с гармонической зависимостью от времени [7, 8] легко получить уравнение Гельмгольца, в общем виде представляющее следующее векторное уравнение:

$$\nabla^2\boldsymbol{\Psi} + k^2\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{f}, \quad (3)$$

где  $\boldsymbol{\Psi}$  – искомая функция, в общем случае 4х мерный потенциал поля [9], три компоненты этого вектора характеризуют магнитное поле и одна – электрическое;

$\mathbf{f}$  – выражение, описывающее наличие свободных зарядов в расчетной области;

$k^2$  – квадрат модуля волнового вектора:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (4)$$

При расчете электромагнитных полей электротехнических систем уравнение (3) часто дополняют однородным условием Неймана, определяющим значение нормальной производной на границе равным нулю, и граничным условием Дирихле. Последнее описывает априори известные значения искомой функции на границе области.

Учитывая, что  $k^2$  для электротехнических комплексов, использующих промышленные частоты, принимает величину ничтожно малую ( $\sim 10^{-12}$ ), то уравнение Гельмгольца вырождается в уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = f(x, y, z), \quad (5)$$

а в случае отсутствия в расчетной области источников, т.е.  $f(x, y, z) = 0$ , в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = 0. \quad (6)$$

Для решения задачи распределения электромагнитного поля в электротехническом комплексе может быть применено множество различных методов [10]. Их можно подразделить на аналитические – дающие решение в явном виде, численные – вычисляющие значения искомых функций с привязкой к конечному набору координатных точек и численно-аналитические. В последнем случае результат ищется в виде некоторых аналитических функций для которых численно производится расчет удовлетворения граничным условиям.

Применение аналитических методов является возможным лишь для электротехнических комплексов простейшей конфигурации, представляющих академический интерес и преимущественно хорошо известных. Однако получаемые при их использовании решения в явном виде имеют наивысшую точность и могут быть использованы с целью верификации остальных методов.

Численные методы, в свою очередь, получили широкое распространение в настоящее время ввиду высокой адаптивности к условиям и ограничениям практических и научных задач, а также из-за существенной синергии от развития цифровых технологий. Данные методы моделирования электромагнитных полей подразделяются на интегральные и дифференциальные [11]. К интегральным относятся методы пространственных интегральных уравнений и различные формулировки метода граничных элементов.

В свою очередь методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) относятся к дифференциальным методам. При этом в реализации МКЭ сложнее МКР, что компенсируется предоставляемыми преимуществами. Так МКЭ позволяет:

- производить вычисления для стационарных и нестационарных задач с расчетной областью произвольной формы, что часто необходимо при моделировании сложных реальных объектов [6];
- исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- для расчетов взаимосвязанных систем и решения физических задач из разных областей использовать построенную сетку без ее изменения.

Помимо этого, существует возможность варьирования размеров конечных элементов в зависимости от требуемой точности вычислений

[12]. Эти и другие преимущества позволяют МКЭ быть одним из ведущих методов численного решения физических задач.

В настоящее время разработано множество программных комплексов (Ansys, MSC Nastran, Marc, Comsol Multiphysics и др.), использующих численные методы для широкого спектра моделируемых задач [8]. Применение метода конечных элементов в подобных программах стало особенно популярным после разработки алгоритмов автоматической генерации сетки, таких как триангуляция Делоне, позволяющих раскрыть и использовать значительный потенциал совместного использования МКЭ и современных вычислительных средств.

Таким образом, с целью научных исследований сложных электротехнических комплексов целесообразнее использовать современные программные вычислительные пакеты, которые позволят не только рассчитать моделируемый объект близко к реальному, но и произвести изучение его возможных модификаций с целью улучшения интересующих технических характеристик.

## МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЙ

С целью оценки степени электромагнитного влияния железнодорожной тяговой сети на смежную кабельную линию произведено математическое моделирование участка железной дороги, профиль которой показан на Рис. 1.

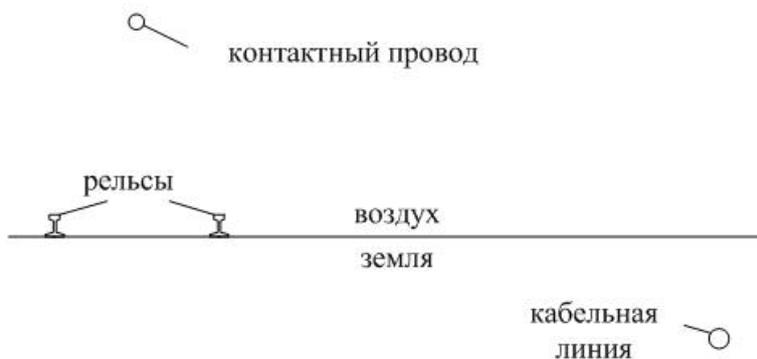


Рис. 1. Модель участка железной дороги

В качестве системы питания на участке выбрана наиболее распространенная – система переменного тока 27,5 кВ. Данная система с точки зрения влияния создает несбалансированное электромагнитное поле, т.к. в качестве прямого проводника используется контактный провод, подвешенный на опорах на высоте 6 м над землей, а обратными являются рельсы. В зону действия порождаемого электромагнитного поля попадает кабельная линия, расположенная на глубине 1 м под землей и отнесенная от крайнего рельса на 5 м. Модель может иметь любые внешние

геометрические границы, так как расчет производится с применением МКЭ.

В качестве источников электромагнитного влияния, как было сказано выше, выступают контактный провод и рельсы. Контактный провод для модели выполнен медным проводником круглого сечения с радиусом 5,6 мм, что эквивалентно по сечению медному фасованному контактному проводу МФ-100, с удельным электрическим сопротивлением 0,0177 мкОм×м.

Каждый рельс в модели выполнен из стали с соблюдением основных геометрических размеров для марки Р-50. Расстояние между ними 1520 мм. Удельное электрическое сопротивление стали принято равным 0,12 мкОм×м.

Воздух по параметрам соответствует идеальному диэлектрику.

Рельсы имеют непосредственный гальванический контакт с землей, которая представлена однородной глиной. Удельное электрическое сопротивление глины 20 Ом×м. Так как в действительности рельсы размещаются на специально уложенной балластной призме, то для имитации ее наличия между подошвой рельс и землей размещен тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 0,2 м балластной призмы с удельным электрическим сопротивлением 1 кОм×м.

В качестве объекта, по которому оценивался результат воздействия генерируемого электромагнитного поля, была выбрана стальная броня кабельной линии. Данный слой является первым металлическим слоем и выполняет функции защиты как от механических повреждений, так и от влияний внешних полей. Следовательно, оказываемое на него воздействие наиболее, а их результатом является наведенный на оболочку ток. Для моделирования в качестве оболочки выбрана стальная труба с внутренним радиусом 20 мм и толщиной 1 мм. Удельное электрическое сопротивление 0,12 мкОм×м. Так как кабель находится в земле и имеет внешнюю изоляцию, то для ее имитации также использован тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 5 мм изоляционного материала с удельным электрическим сопротивлением 73,83 Ом×м.

Включение кабельной линии в расчетную модель позволяет снизить погрешности при расчете распределения токов в тяговой сети и создаваемых электромагнитных полей, а также определить величину наведенного влияния.

Помимо указанных геометрических размеров объектов для модели также важную роль играет протяженность. Реальные железнодорожные участки, расположенные между соседними станциями, занимают десятки километров. Однако, такие размеры для математической модели с высокой степенью детализации элементов на текущем этапе развития

вычислительной техники нереализуема. В связи с чем было выполнено моделирование небольшого участка железнодорожного пути позволяющее последующую экстраполяцию результатов.

Моделирование произведено с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics. В данном комплексе помимо задания геометрических размеров модели и указания параметров материалов также необходимо выбрать режим вычисления и настроить соответствующие физическим процессам модули, которые в свою очередь определяют решаемые уравнения. Для вычисления исследуемой модели выбран стационарный гармонический режим с расчетами на частоте основной гармоники питающего тока, т.е. 50 Гц.

Для задания начальных условий проводники модели объединены в соответствии со схемами, приведенными на Рис. 2.

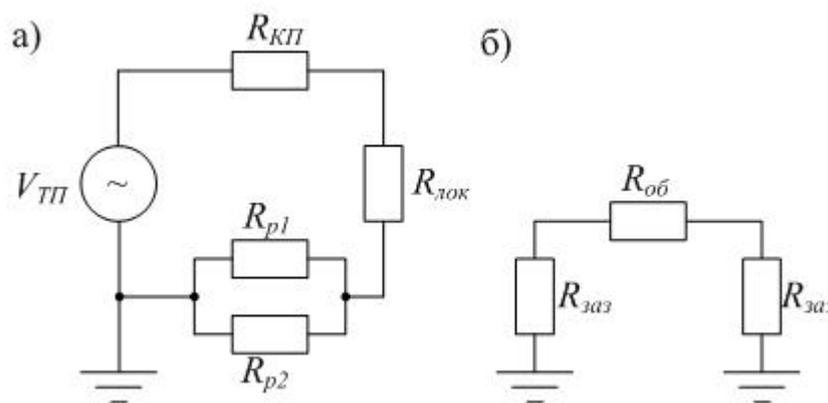


Рис. 2. Моделируемые структурные схемы:

а) цепь тягового питания (влияющая); б) подверженная влияниям цепь

В качестве параметров источника выбран переменный ток со стандартным значением напряжения для тяговой подстанции  $V_{ТП} = 27,5$  кВ. Элементы  $R_{КП}$ ,  $R_{р1}$  и  $R_{р2}$  представляют собой связующие терминальные элементы в которых протекающий ток управляется напряжением. Порты входов и выходов этих терминалов связаны с аналогичными портами, указанными для соответствующих элементов геометрической схемы. Для контактного провода принято обозначение  $R_{КП}$ , а  $R_{р1}$  и  $R_{р2}$  для левого и правого рельса. В качестве нагрузки цепи выступает сопротивление  $R_{лок}$  эквивалентное тому, что вызывает электрические потери при прохождении тока по цепям тягового питания локомотива.

Для моделирования случая нахождения на участке только одного локомотива сопротивление  $R_{лок}$  выбрано исходя из соображения, что амплитуда тока, потребляемого одним электроподвижным составом из

тяговой сети, равна 140 А. Соответственно для рассматриваемой модели  $R_{\text{лок}} = 194,456 \text{ Ом}$ .

Аналогичным терминальным элементом  $R_{\text{об}}$  указана оболочка кабеля, которая с обоих концов участка заземлена, через эквивалентные сопротивления  $R_{\text{заз}}$ . Данное подключение имитирует подключение оболочки кабеля к контуру заземления при вводе его в объекты железнодорожной инфраструктуры. По требованиям к заземляющим контурам оборудования напряжением до 1000 В переменного тока сети с глухозаземленной нейтралью в однофазных сетях напряжением 220 В их сопротивление в любое время года не должно превышать 4 Ом [13]. Соответственно для рассчитываемой модели  $R_{\text{заз}}$  принято равным 4 Ом. Однако при улучшении контура заземления и соответственно уменьшении значения сопротивления ток, наведенный и стекающий с оболочки кабеля, будет увеличиваться, что с одной стороны повысит эффект экранирования, а с другой, при значительных токах, может привести к возникновению аварийной ситуации от перегрева и воспламенения кабеля.

В качестве граничных условий указаны граничные условия магнитного потенциала и электрической изоляции, устанавливающие тангенциальные компоненты магнитного потенциала  $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$  и нормальные компоненты электрического тока  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$  равными нулю, на внешних границах надземной части модели, дополненные граничным условием магнитного потенциала и условием заземления  $V = 0$  на внешних границах подземной части модели.

Для компенсации проблемы ограниченности расчетной области по ее краям, добавлены небольшие зоны, к которым применена настройка условно бесконечных областей. При расчете эти области масштабируются с коэффициентом  $10^3$ , что позволяет уменьшить количество симплексов и снизить искажения в пределах интересующей области с выполнением граничных условий.

Помимо рассмотренных выше параметров следует описать глубину модели. В связи с ограниченностью вычислительных ресурсов отсутствует возможность построить полноценную модель участка железной дороги между двумя станциями. Однако, в первом приближении достаточно выполнить вычисления для небольшой его части с последующим обобщением результатов. Соответственно, для рассматриваемой задачи геометрическая протяженность участка принята равной 2 м. Помимо этого, для всех элементов модели по оси  $z$ , отвечающей за протяженность, использованы дополнительные настройки масштабирования с кратностью  $\times 5$ . Таким образом геометрически модель прорисована для 2 м, а в математическом представлении и графическом отображении она эквивалентна участку 10 м. Это позволило существенно сократить сложность вычислений, увеличив при этом моделируемый участок. Данную процедуру возможно использовать так как в модели в пределах

рассматриваемого участка все элементы сохраняют свои относительные геометрические положения неизменными.

Следующим шагом моделирования с применением МКЭ является построение сети конечных элементов, выполняемое автоматически по задаваемым параметрам. Результат построения сетки представлен на Рис. 3. Следует отметить, что сетка строится для всего объема, однако, визуально отображаются лишь ребра конечных элементов, располагаемые на внешних границах объектов. Также на Рис. 3 видно, что размер сетки вблизи и в самих проводящих элементах существенно меньше, чем в свободном пространстве. Таким образом в МКЭ обеспечивается дополнительная экономия вычислительных ресурсов при сохранении требуемой точности вычислений [12].

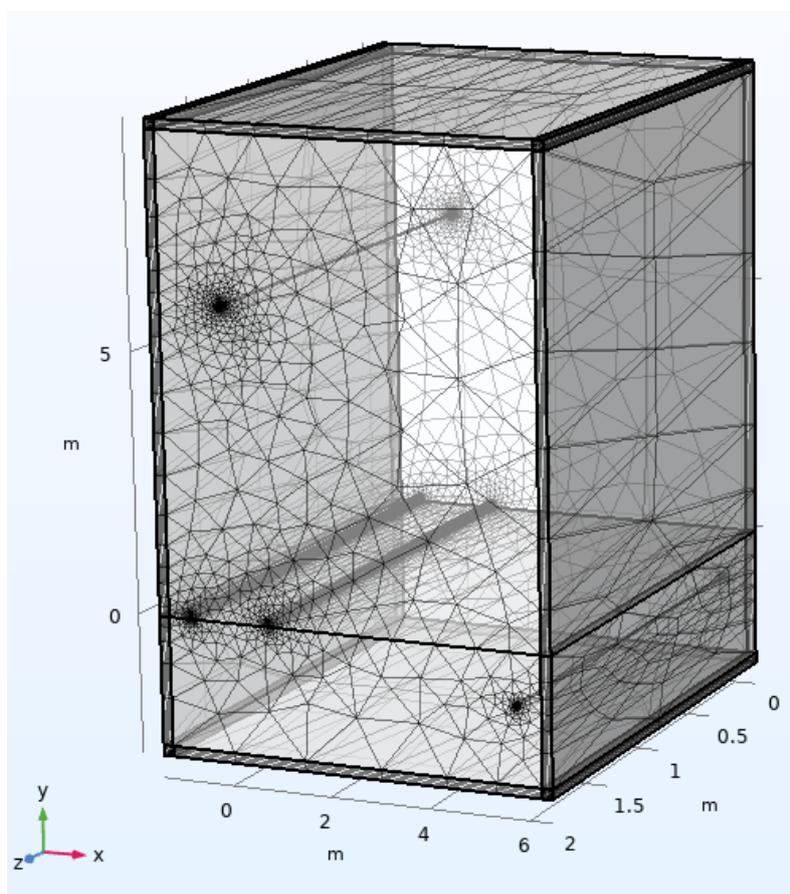


Рис. 3. Визуализация сетки конечных элементов

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результатом моделирования являются изображения нормализованной плотности магнитного потока (Рис. 4), и электрического поля (Рис. 5), а также численное распределение токов в проводниках модели.

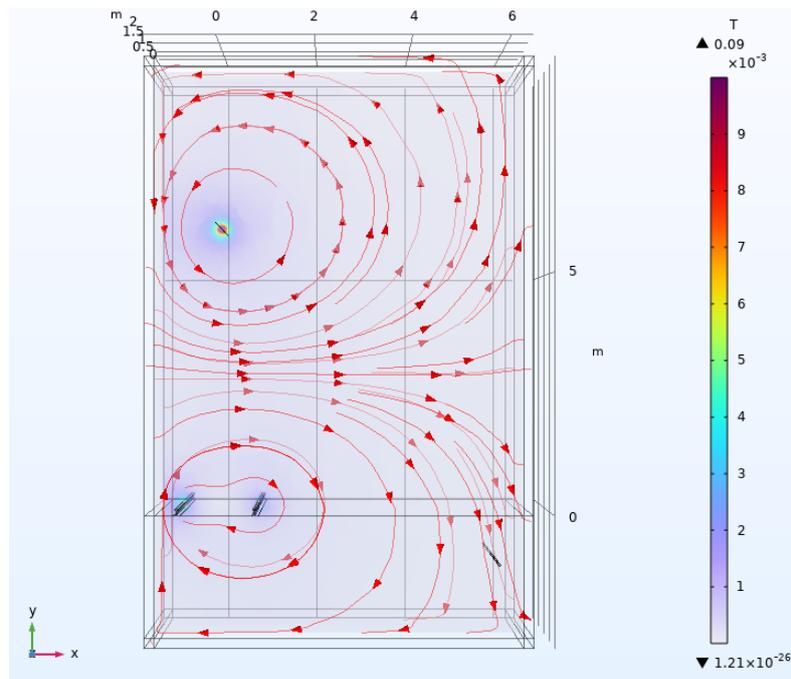


Рис. 4. Нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности

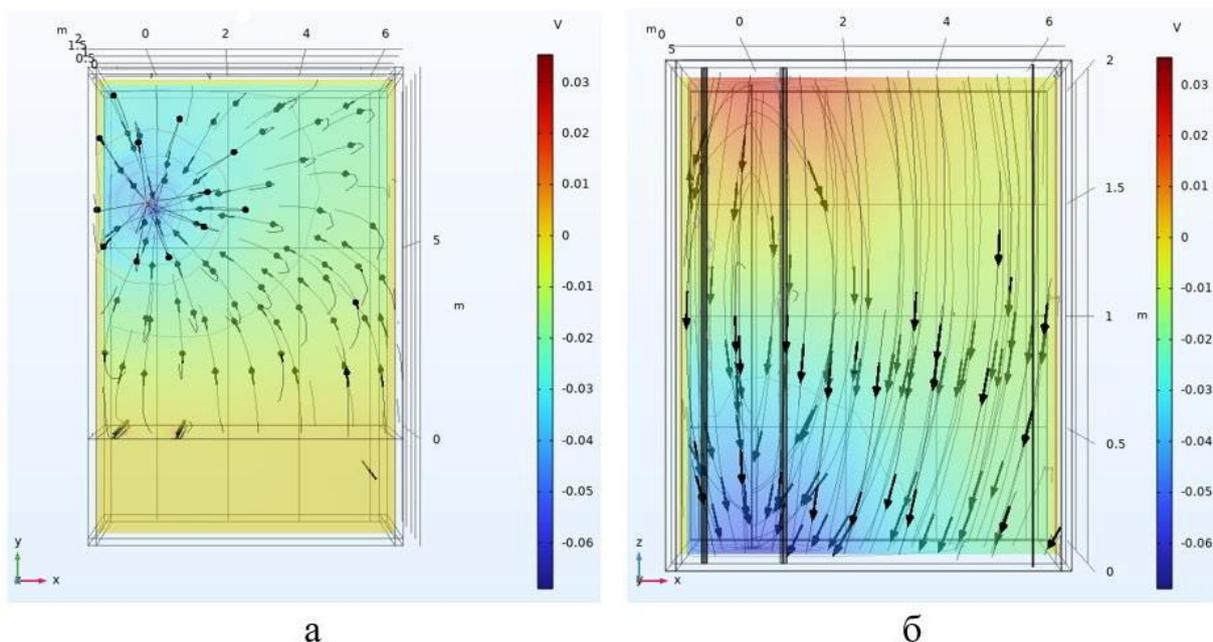


Рис. 5. Электрическое поле с линиями напряженности: а – прямой вид; б – вид сверху

По Рис. 4 видно, что токи в рельсах направлены в противоположную сторону току в контактном проводе. Их магнитные поля также направлены встречно, что иллюстрируется направлениями линий напряженности, и частично компенсируют друг друга, снижая наводимое на кабельную линию влияние. При этом основное влияние оказывает магнитное поле, создаваемое рельсами, а не поле от контактного провода. Наличие

кабельной линии в свою очередь влияет на распределение токов между рельсами. Также отметим, что земля не является помехой для магнитной составляющей воздействия.

Линии напряженности электрического поля, представленного на Рис. 5, замыкаются между началом и концом моделируемого контактного провода, а также на землю. Это обусловлено разностью потенциалов между точкой подключения источника питания с одной стороны и нагрузки с другой, вызываемое электрическими потерями в самом проводе. Земля в свою очередь является проводником с нулевым потенциалом. Таким образом влияние электрической составляющей на кабельную линию отсутствует.

Численное распределение токов в проводниках модели представлено в Табл. 1 в графе эксперимент № 1.

*Таблица 1. Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы при частоте 50 Гц для двух величин питающего тока*

Моделируемый проводник	Эксперимент № 1		Эксперимент № 2	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	141,36	-0,94	599,61	-3,97
Рельс первый	81,13	179,13	344,13	176,09
Рельс второй	60,23	178,98	255,48	175,95
Оболочка кабельной линии	0,725	73,99	3,07	70,96

Полученное значение тока в контактном проводе эквивалентно потреблению одиночной «электрички». При этом рассмотрено влияние лишь от одного из всех возможных источников электромагнитных излучений с расчетом лишь для одной влияющей гармоники. Реальный ток при прохождении электроподвижного состава имеет множество гармонических составляющих в широком диапазоне частот [14], образуемых в результате не идеальности преобразовательной аппаратуры локомотива, искрообразования при движении пантографа по контактному проводу, а также проблем с верхним строением железнодорожного пути. Результат воздействия такого полигармонического спектра складывается по закону суперпозиции и принимает стохастический характер.

Результат моделирования может быть экстраполирован на более протяженный участок, в пределах расстояния между двумя заземлениями смежной линии, исходя из следующих соображений: при увеличении протяженности возрастет наводимое падение напряжения между концами исследуемой линии, но также пропорционально увеличится и сопротивление материала, что в итоге даст ту же величину наведенного тока. При наличии дополнительных заземлений наводимый ток будет

секционироваться, что снизит его максимальную величину на отдельных участках между двумя соседними заземлителями.

Для сравнения в работе [15] производится моделирование движения пачки поездов по участку и приводится профиль тока поезда массой 6300 т, для которого указываются пиковые значения потребляемого тока порядка 600 А. Также в [15] выполняется расчет при одновременном движении пачек поездов в обоих направлениях.

В связи с этим произведен пересчет токов по рассматриваемой модели при нагрузке эквивалентной грузовому поезду. Результат представлен в Табл. 1 в графе эксперимент № 2. Как видно, наводимые на оболочку кабеля токи также существенно возросли.

Из полученных результатов моделирования, с учетом [15], можно сделать вывод, что наводимый на смежную линию ток имеет стохастический характер и может быть существенно выше прогнозируемых результатов в случае, например, прохождения по участку грузового электроподвижного состава, при движении пачки поездов, при одновременном прохождении поездов по участку в обоих направлениях, при наложении влияний от множества различных факторов и т.д.

Также значительный интерес представляет исследование методов снижения наводимых влияний. Одним из эффективных методов является изменение схемы питания, например, применение системы питания с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Используемый программный комплекс позволяет гибко подстраивать модель под исследуемую задачу. Так для перевода модели на систему с ЭУП геометрическая часть была дополнена двумя медными проводниками, расположенными с внешней стороны опоры контактной сети. Усиливающий провод разместили на расстоянии 4,5 м от контактного провода и на высоте 8 м от головки рельса. Экранирующий подвесили соответственно на расстоянии 3,8 м от контактного провода и на 8,4 м над рельсами.

Схема подключения при этом была изменена следующим образом: усиливающий провод подключен параллельно к контактному, а экранирующий – к рельсам. Полученные распределения полей приведены на Рис. 6.

Численное распределение токов в проводниках модели с ЭУП для двух вариантов потребляемых токов представлено в Табл. 2.

Как видно по результатам моделирования перевод тягового питания на систему с ЭУП позволяет получить снижение наводимых на смежную линию токов в 1,92 раза, что согласуется с теоретическими положениями и в свою очередь подтверждает возможность применения МКЭ и предлагаемой модели для исследований в сфере определения наводимых влияний и разработки методов защиты от них.

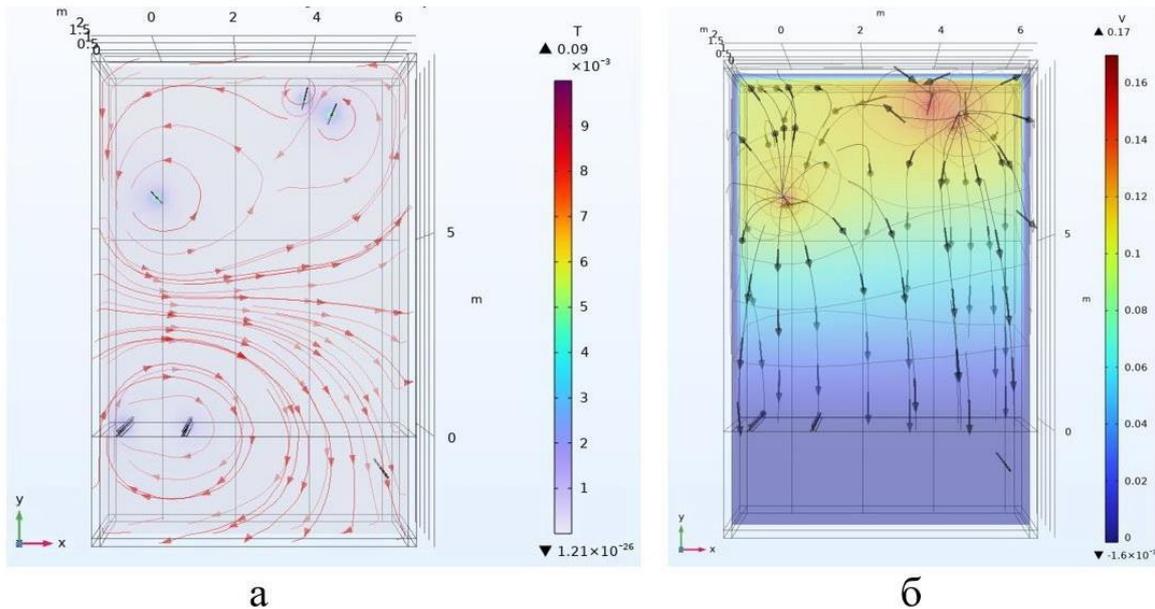


Рис. 6. Распределение полей для модели с системой тягового электропитания с экранирующим и усиливающим проводниками: а – магнитное поле; б – электрическое поле

Таблица 2. Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы с ЭУП при частоте 50 Гц для двух величин питающего тока

Моделируемый проводник	Эксперимент № 3		Эксперимент № 4	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	66,77	-0,603	283,77	-2,174
Рельс первый	52,25	179,21	222,06	177,64
Рельс второй	39,1	179,06	166,19	177,49
Оболочка кабельной линии	0,376	73,59	1,6	72,02
Усиливающий провод	74,62	-0,377	317,17	-1,948
Экранирующий провод	50,05	-179,81	212,71	178,62

Однако следует отметить, что математическое моделирование позволяет получить значения, лишь для конкретного модельного примера, имеющего ряд ограничений и допущений. Так данная модель в качестве источника влияний рассматривает лишь систему тягового питания. Реальные наведенные токи, в свою очередь, являются результатом одновременных случайных воздействий от множества источников [1, 14] и естественно будут отличаться от результатов моделирования.

Для детального анализа процессов образования наводимых влияний необходимо осуществить сбор базы статистических данных и, используя стохастический математический аппарат, изучать параметры

распределений, выполняя декомпозицию и выявление характеристик и степени влияния отдельных источников. После определения статистических параметров влияющих источников необходимо применение математического моделирования, которое позволит детально изучить процессы воздействий и разработать соответствующие меры по защите от них.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат моделирования позволяет уверенно фиксировать высокую степень влияния электромагнитных полей на кабельные линии железнодорожной инфраструктуры со стороны системы тягового электропитания.

Математическое моделирование обладает возможностью разложения степени влияния на составляющие факторы, что позволяет раскрыть внутреннюю структуру механизма взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса и открывает способы борьбы с вредными последствиями наводок.

Исследования показывают, что наводки с ростом трафика грузоперевозок будут расти, а, следовательно, необходимо разрабатывать современные меры защиты от электромагнитных влияний.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

Доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО РГУПС Владимир Николаевич Таран рекомендует данную статью к публикации.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 110–126. [Apollonskiy SM. Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):110-126 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201512110-126
2. Капкаев А.А. Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи: дис... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону; 2017. – 208 с. [Капкаев АА. Integratsiya ekraniruyushchego provoda v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s volokonno-opticheskoi liniei svyazi. [dissertation]. Rostov-on-Don; 2017. 208 p. (In Russ.)]. Доступно по: URL: [https://www.rgups.ru/site/assets/files/92935/dissertatciia\\_kapkaev\\_a.a.\\_na\\_sait.pdf](https://www.rgups.ru/site/assets/files/92935/dissertatciia_kapkaev_a.a._na_sait.pdf) Ссылка активна на: 01.09.2022.

3. Buyakova N, Zakaryukin V, Kryukov A. Control of electromagnetic environment in smart traction power supply systems. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019;91:01009. doi: 10.1051/e3sconf/20199101009
4. Kryukov AV, Cherepanov AV, Kryukov AE. Electromagnetic Influences of Traction Networks Amplified by Coaxial Cable on Pipelines. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020:1-5. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271625
5. Serdiuk TM. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. 2017:1-6. doi: 10.1109/EMCEurope.2017.8094637
6. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – 1986. – 229 с. [Sil'vester P, Ferrari R. *Metod konechnykh jelementov dlja radioinzhenerov i inzhenerov-jelektrikov*; 1986. 229 p. (In Russ.)] Доступно по: <https://bookscat.org/dl/445310/ca156e> Ссылка активна на: 01.09.2022.
7. Савченко А.О., Савченко О.Я. Проводящее тело в переменном магнитном поле // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 7. – С. 8-12. [Savchenko AO., Savchenko OYa. *Provodyashchee telo v peremennom magnitnom pole. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015;85(7):8-12. (In Russ.)]. Доступно по: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41996>. Ссылка активна на: 01.09.2022.
8. Малых М.Д., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. и др. О сведении уравнений Максвелла в волноводах к системе связанных уравнений Гельмгольца // *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science* – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 39-48. [Malykh MD, Sevast'yanov AL, Sevast'yanov LA et al. *O svedenii uravnenii Maksvellla v volnovodakh k sisteme svyazannykh uravnenii Gel'mgol'tsa. Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. 2018;26(1):39-48. (In Russ.)] Доступно по: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-svedenii-uravneniy-maksvella-v-volnovodah-k-sistemsvyazannyh-uravneniy-gelmgol'tsa> Ссылка активна на: 01.09.2022.
9. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр.– М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с. [Landau LD, Lifshits EM. *Teoreticheskaya fizika: Ucheb. posobie. V 10 t. T. II. Teoriya polya*. 7 ed. – Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. 512 p. (In Russ.)] Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://bookscat.org/dl/451228/de14ee>
10. Лонкина Д.В. Электродинамический анализ и синтез частотно-селективных устройств на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением: дис.... канд. физ.-мат. наук. – Ростов-на-Дону; 2022. – 173 с. [Lonkina DV. *Elektrodinamicheskii analiz i sintez chastotno-selektivnykh ustroystv na tsilindricheskikh volnovedushchikh strukturakh so slozhnymi metallicheskimii grebnyami i kusochno-sloistym dielektricheskim zapolneniem [dissertation]*. Rostov-on-Don; 2022. 173 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://hub.sfedu.ru/storage/1/1298243/59601379-93ac-4d7a-83d0-8fe0fa772f4d/>
11. Калимов А.Г. Развитие численных методов расчета электромагнитных полей, основанных на применении пространственных интегральных уравнений: автореф. дис.... д-ра техн. наук – СПб; 2013. – 33 с. [Kalimov AG. *Razvitie chislennykh metodov rascheta elektromagnitnykh polei, osnovannykh na primenenii prostranstvennykh integral'nykh uravnenii [dissertation abstract]* St. Petersburg; 2017. 21 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/3718.pdf/info>
12. Таран В.Н., Шевлюгин М.В., Шандыбин А.В. Точность численных методов

- анализа электростатических полей // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – №1. – С. 59–70. [Taran VN, Shevlyugin MV, Shandybin AV. The Accuracy of Numerical Methods for Assessing External Electrical Influences. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):59-70. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217159-70
13. ГОСТ Р 58321-2018 Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. [GOST R 58321-2018 Elektroustanovki sistem tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi peremennogo toka (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200161809>
14. Мирошниченко Е.Е. Тяговый вентильно-индукторный двигатель с улучшенными показателями надежности подшипниковых узлов для электрического подвижного состава // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – №2. – С. 97–105. [Miroshnichenko EE. Switched reluctance traction motor with improved indicators of the reliability of bearing units for an electric rolling stock. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):97-105. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217297-105
15. Нгуен Ты. Определение электромагнитных влияний высоковольтных и многоамперных ЛЭП на смежные линии: дис.... канд. техн. наук. – Иркутск; 2021. – 188 с. [Nguen Ty. Opredelenie elektromagnitnykh vliyaniy vysokovol'tnykh i mnogoampornykh LEP na smezhnye linii: [dissertation]. Irkutsk; 2021. 188 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: [https://isem.irk.ru/upload/iblock/3d8/Nguen-Ty-dissertatsiya-na-sayt\\_.pdf](https://isem.irk.ru/upload/iblock/3d8/Nguen-Ty-dissertatsiya-na-sayt_.pdf)

**Сведения об авторе:**

**Шандыбин Алексей Викторович**, старший преподаватель, заведующий лабораторией;

eLibrary SPIN: 4444-3213; ORCID: 0000-0003-2052-5480; Scopus ID: 57205099726;

E-mail: shav850@mail.ru

**Information about the author:**

**Aleksey V. Shandybin**, senior lecturer, head of the laboratory;

eLibrary SPIN: 4444-3213; ORCID: 0000-0003-2052-5480; Scopus ID: 57205099726;

E-mail: shav850@mail.ru

**Цитировать:**

Шандыбин А.В. Моделирование электромагнитного взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 89–104. doi: 10.17816/transsyst20228389-104

**To cite this article:**

Shandybin AV. The simulation of electromagnetic interaction of the components of transport electrical complex. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):89-104. doi: 10.17816/transsyst20228389-104

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

УДК [UDC] 621.3

DOI 10.17816/transsyst202283105-122

© **И.М. Казымов, Б.С. Компанец**

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
(Барнаул, Россия)

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К РЕГУЛИРОВАНИЮ И НАСТРОЙКЕ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ НУЖД ЭЛЕКТРОТЕРМИИ**

**Обоснование:** Разработка и внедрение системного подхода к настройке и взаимной адаптации источников и потребителей электрической энергии повышенной частоты в установках индукционного нагрева, основанного на исследовании взаимосвязей и закономерностей изменения основных параметров индукционных установок, в том числе неконтролируемых изменений, возникающих в ходе технологического процесса, является актуальной задачей для повышения эффективности производства на сегодняшний день в Российской Федерации и за рубежом.

**Цель:** Создание эффективного подхода к регулированию и настройке режимов работы оборудования для устойчивого повышения уровня унификации установок индукционного нагрева.

**Методы:** Экспериментальное исследование режимов работы индукционных установок, компьютерное моделирование и САПР.

**Результаты:** Описание разработанного подхода, внедрение системного подхода, возможности и перспективы применения, рекомендации по практическому использованию в промышленности.

**Заключение:** Полученные результаты позволяют углубить понимание электрических процессов, происходящих в установках индукционного нагрева и могут быть использованы на практике в промышленности для проведения унификации применяемых источников энергии повышенной частоты; могут представлять интерес для исследователей, работающих в данной сфере, а также для разработчиков промышленного оборудования для индукционного нагрева.

**Ключевые слова:** электротермия, специальные типы электрических машин, индукционный нагрев, генераторы повышенной частоты, преобразовательное оборудование, регулирование электрических режимов.

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

© **I.M. Kazymov, B.S. Kompaneets**

Altai State Technical University named I.I. Polzunov  
(Barnaul, Russia)

## DEVELOPMENT OF A SYSTEMATIC APPROACH TO THE REGULATION AND ADJUSTMENT OF HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATING UNIT FOR THE NEEDS OF ELECTROTHERMY

**Background:** The development and implementation of a systematic approach to the regulation and mutual adaptation of sources and consumers of increased frequency electrical energy in induction heating equipment, based on the study of the relationships and patterns of changes in the main parameters of induction equipment, including uncontrolled changes that occur during the technological process, is an urgent task for improving production efficiency today in the Russian Federation and abroad.

**Aim:** Creating an effective approach to the regulation and adjustment of equipment operation modes for a sustainable increase in the level of unification of induction heating equipment.

**Methods:** Experimental study of operating modes of induction installations, computer modeling and CAD.

**Results:** Description of the developed approach, introduction of a systematic approach, possibilities and prospects for application, recommendations for practical use in industry.

**Conclusion:** Obtained results make it possible to deepen the understanding of the electrical processes occurring in induction heating installations and can be used in practice in industry to unify the applied high-frequency energy sources; may be of interest to researchers working in this field, as well as to developers of industrial equipment for induction heating.

**Keywords:** electrothermy, special types of electrical machines, induction heating, high-frequency generators, converting equipment, regulation of electrical regimes.

### ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение технологии индукционного нагрева в Российской Федерации и в мире является значимым вектором развития современной промышленности, что особенно заметно в сфере формообразования (кузнечные, штамповочные, прокатные, литейные производства) и термообработки различных изделий.

Развитие технологий индукционного нагрева берет начало в конце XIX – начале XX веков, когда были созданы первые установки индукционной плавки металлов. Позднее индукционный нагрев нашел применение в термообработке и формообразовании [1].

Сегодня применение данной технологии не ограничивается металлообработкой и широко используется в различных сферах промышленности и экономики [1, 2]:

- плавка металла;
- объемный нагрев;
- поверхностная термообработка;
- сварка металлов;
- сварка изделий из термопластичных материалов;

- нагрев диэлектриков;
- плазменные технологии.

Очевидно, что для различных сфер промышленности применяются индукционные установки различных видов и типов. Основными параметрами индукционного оборудования являются [3–5]:

- частота индукционного тока;
- размеры и форма индуктора;
- мощность источника индукционного тока.

Частота индукционного тока непосредственно определяет сферу использования оборудования: с повышением частоты снижается глубина прогрева материала, что позволяет организовать как объемный, так и поверхностный нагрев [6].

Размеры и форма индуктора определяют область заготовки, подвергающуюся нагреву, что позволяет организовать как объемный, так и местный нагрев заготовки [7–9].

Мощность источника индукционного тока определяет главным образом производительностью оборудования, характеризуется количеством одновременно обрабатываемых заготовок. Однако, мощность источника индукционного тока в некоторых случаях является критическим параметром скорости нагрева, т.к. для ряда процессов (в том числе термообработка) низкая скорость нагрева приводит к ухудшению качества процесса (например, образование окалины) и к расширению зоны прогрева под воздействием естественной теплопередачи из поверхностных слоев вглубь заготовки, что также может негативно отразиться на качестве и в некоторых случаях является недопустимым [10].

Таким образом, не возникает противоречий для использования различных потребителей индукционного тока в паре с незначительно отличающимися источниками (например, близкие частоты 8,0 и 10,0 кГц, используемые для поверхностной закалки средних и крупных заготовок). Например, при использовании источника индукционного тока меньшей частоты, но большей мощности возможно подбором режимов получить аналогичную глубину прогрева. В ряде случаев такая унификация позволит выполнять резервирование технологического индукционного оборудования: унифицировать как источники индукционного тока для повышения надежности их эксплуатации, так и потребителей индукционного тока для создания возможности производить технологические операции на различных установках с применением переналадки.

Однако на сегодняшний день зачастую установки индукционного нагрева являются в значительной мере индивидуализированными и проектируются рассчитанными на работу исключительно в паре «источник – потребитель», что ограничивает надежность эксплуатации

промышленного оборудования по причине низкой степени унификации применяемых узлов и агрегатов даже в однотипных установках. Основным различием при этом является частота тока в индукционной установке, что накладывает определенные ограничения для использования аналогичных, но спроектированных для использования в составе иной установки индукционного нагрева, модулей и блоков [11, 12].

Создание и внедрение системных методов регулирования и настройки оборудования индукционного нагрева для решения задачи практического использования различных комбинаций источников и потребителей индукционного тока является актуальной задачей на современном этапе развития электротермии в Российской Федерации и за рубежом [13].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Системный подход к регулированию и настройке установок индукционного нагрева повышенной частоты для нужд электротермии должен обеспечивать:

- возможность моделирования электрических процессов в индукционной установке;
- возможность обеспечить требуемый режим работы путем изменения параметров элементов, поддающихся настройке и предполагающих вмешательство;
- возможность обеспечить защиту от несанкционированного вмешательства и/или смягчение последствий такого вмешательства путем ограничения пределов регулирования режимов работы;
- перспективность (ориентированность на развитие отрасли, в том числе в части цифровизации автоматизированных систем управления технологическими процессами) [3, 4].

В силу объективных причин, широкие пределы унификации (например, унификация литейного и закалочного оборудования) не являются в достаточной мере оправданными. Однако, для правильного и надежного функционирования производства унификация однотипного оборудования возможна и желательна [14].

В связи с этим разрабатываемый подход к настройке установок индукционного нагрева должен позволять получать подтверждаемые с достаточной для практического использования точностью результаты моделирования режимов работы оборудования индукционного нагрева; получать обоснованные наборы численных значений параметров для настройки с целью достижения требуемых результатов, а также иметь возможность для дальнейшей трансформации в автоматизированную

информационно-измерительную систему для контроля работы оборудования для индукционного нагрева в реальном времени.

## **ПРОТЕКАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

Вне зависимости от детального конструктива оборудования для индукционного нагрева подобные установки содержат следующие основные узлы:

- преобразователь трехфазного переменного напряжения промышленной частоты (низкого или среднего класса напряжения) в однофазное переменное напряжение повышенной частоты (фиксированной или регулируемой) – источник;
- нагрузка индукционной установки, представляющая собой подключаемый к источнику напрямую или через согласующий трансформатор индуктор – потребитель;
- вспомогательные элементы (в большинстве случаев конденсаторы), при помощи которых возможно регулировать режимы работы установки.

Упрощенная электрическая схема типичной индукционной установки показана на Рис. 1.

Как видно из Рис. 1, указанным образом может быть представлена любая индукционная установка, будь то установка с электромеханическим генератором однофазного напряжения повышенной частоты (специальный тип электрической машины), с ламповым генератором высокочастотных колебаний или тиристорная (транзисторная) установка со звеном постоянного тока. Необходимость получения синусоидальной формы протекающего через нагрузку тока диктует требование к использованию реактивных элементов в цепи нагрузки (индуктивность, емкость). В том числе схема, приведенная на Рис. 1, в достаточной для практического использования мере применима и к установкам, предполагающим подключение нагрузки через согласующий трансформатор, например, типа ТЗ4-800М.

В рамках настоящей статьи описывается исследование, проведенное на основании результатов эксперимента с использованием индукционной установки с источником индукционного тока, представленного генератором повышенной частоты типа ВПЧ-100-8000 УХЛ4 (мощность 100 кВт, выходная частота 8000 Гц) и с нагрузкой, представленной индуктором, подключаемым напрямую.

Результаты эксперимента сведены в Табл. 1.

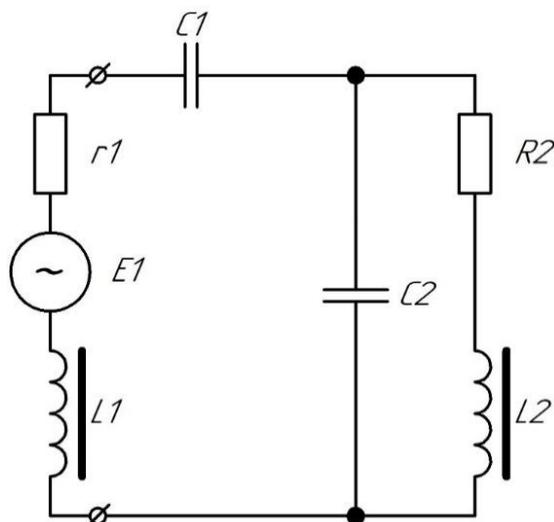


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема типичной индукционной установки

$E1$  – ЭДС источника индукционного тока;

$L1$  – внутренняя индуктивность источника индукционного тока;

$r1$  – внутреннее активное сопротивление источника индукционного тока;

$C1$  – продольная емкость цепи;

$R2$  – активная составляющая сопротивления нагрузки;

$L2$  – индуктивность нагрузки;

$C2$  – параллельная емкость нагрузки

Таблица 1. Результаты эксперимента

№ опыта [№ exp.]	$C1$ , мкФ [ $\mu F$ ]	$C2$ , мкФ [ $\mu F$ ]	$E1$ , В [V]	$U1$ , В [V]	$U2$ , В [V]	$I_n$ , А [A]	$\cos f$	Примечание [Note]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	41	800	-	50	-	-	
2	0	56	800	-	250	-	-	
3	0	76	200	-	0	10	-	
4	0	76	400	-	0	20	-	
5	0	76	600	-	0	30	-	
6	0	76	800	-	40	50	-	
7	10	41	800	-	50	-	-	
8	10	56	800	-	250	-	-	
9	20	41	200	-	50	10	-	
10	20	41	400	-	50	20	-	
11	20	41	600	-	80	30	-	
12	20	41	800	-	100	40	-	
13	20	56	200	-	80	15	-	
14	20	56	400	-	140	20	-	
15	20	56	600	-	220	30	-	
16	20	56	800	-	320	40	-	
17	10	61	200	-	50	20	-	
18	10	61	400	-	140	40	-	
19	10	61	600	-	240	50	-	

№ опыта [№ exp.]	C1, мкФ [μF]	C2, мкФ [μF]	E1, В [V]	U1, В [V]	U2, В [V]	I <sub>н</sub> , А [A]	cosφ	Примечание [Note]
20	10	61	800	-	240	60	-	
21	10	66	200	-	40	20	-	
22	10	66	400	-	80	35	-	
23	10	66	600	-	120	50	-	
24	10	66	800	-	200	70	-	
25	10	76	800	250	40	60	-	
26	10	66	800	425	200	70	-	
27	10	56	800	300	320	40	-	
28	10	46	800	50	160	40	-	
29	10	41	800	20	120	40	-	
30	10	31	800	80	80	50	-	
31	10	21	800	100	80	50	-	
32	20	56	800	250	300	40	-	
33	20	46	800	50	120	40	-	
34	20	41	800	50	120	40	-	
35	20	31	800	0	80	40	-	
36	20	26	800	0	80	40	-	
37	20	66	800	350	240	60	-	
38	4,6	66	800	1300	600	-	-	
39	8,2	66	400	280	120	40	-	
40	8,2	66	600	400	220	60	-	
41	8,2	66	800	450	200	70	-	
42	6,9	66	200	-	40	20	-	
43	6,9	66	400	-	160	40	-	
44	6,9	66	600	650	240	70	-	
45	6,9	66	800	700	220	70	-	
46	6,9	56	200	50	80	10	-	
47	6,9	56	400	100	200	20	-	
48	6,9	56	600	150	280	30	-	
49	6,9	56	800	200	360	40	-	
50	6,2	56	400	250	200	30	-	
51	6,2	56	600	250	280	32	-	
52	6,2	56	800	250	360	40	-	
53	6,2	66	400	350	120	40	-	
54	6,2	66	800	800	320	90	0,75 ёмк [cap]	
55	5,6	56	200	150	100	20	-	
56	5,6	56	400	300	200	30	-	
57	5,6	56	600	350	320	40	-	
58	5,6	56	800	300	360	50	-	
59	4,95	56	400	100	200	30	-	
60	4,95	56	600	350	300	40	-	
61	4,95	56	800	250	380	50	-	
62	4,6	56	400	300	200	30	-	
63	4,6	56	600	300	300	35	-	
64	4,6	56	800	350	400	50	0,7 инд [ind]	

№ опыта [№ exp.]	C1, мкФ [μF]	C2, мкФ [μF]	E1, В [V]	U1, В [V]	U2, В [V]	I <sub>н</sub> , А [A]	cosφ	Примечание [Note]
65	4,6	60,95	400	630	400	30	<0,7 ёмк [cap]	
66	4,6	60,3	400	600	420	30	0,9 ёмк [cap]	
67	4,6	58,5	400	400	280	25	1,0 инд [ind]	
68	4,6	58,5	600	550	440	35	0,9 инд [ind]	
69	4,6	58,5	800	500	520	40	0,9 инд [ind]	
70	4,6	58,5	800	500–750	520	50	0,92–0,95 инд [ind]	
71	4,6	58,5	850	550–800	560	55	0,95–1,0 инд [ind]	
72	4,6	58,5	875	560–810	560	55	0,95–1,0 инд [ind]	
73	4,6	59,1	800	550–750	560	55–60	0,95–1,0 инд [ind]	
74	4,6	59,1	850	600–800	600	50	0,95–1,0 инд [ind]	рабочий режим [work mode]

Примечание: 1. ЭДС генератора E1 измерена аналогично напряжению на генераторе U1 в режиме холостого хода.

2. Напряжение на нагрузке U2 измерено как напряжение на параллельно соединенных элементах C2 и R2-L2.

3. При указании диапазонов значений имеется в виду изменение параметров электрического режима по мере нагревания заготовки – приводятся максимальное и минимальное значения.

4. Заведомо недостоверные значения исключены из таблицы и заменены дефисом.

5. Примечание «рабочий режим» приведено для режима, при которых достигаются требуемые параметры нагрева заготовки.

С использованием набора полученных экспериментальных данных и достоверно известных параметров емкости, включенной в цепь, возможно полноценно (или с некоторыми допущениями) при помощи простейших арифметических действий рассчитать неизвестные параметры электрической цепи (Рис. 1). Полученные результаты сведены в Табл. 2 (для случая опыта № 74, приведенного в Табл. 1).

Таблица 2. Результаты расчета параметров цепи

r1, Ом [Ohm]	L1, мкГн [μH]	C1, мкФ [μF]	C2, мкФ [μF]	R2, Ом [Ohm]	L2, мкГн [μH]
1	2	3	4	5	6
0	262	4,6	59,1	0,00881	6,63410

Примечание: Внутреннее сопротивление источника индукционного тока r1 принято нулевым для упрощения расчетов, а также по причине того, что  $r1 \ll X_{L1}$ .

При условии того, что известны основные (неизменные) параметры цепи, а именно величины индуктивности и активных составляющих внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки, становится возможным моделировать работу рассматриваемой индукционной установки в различных режимах.

Нагрузочная характеристика генератора с указанием величины отдаваемой в нагрузку мощности приводится на Рис. 2.

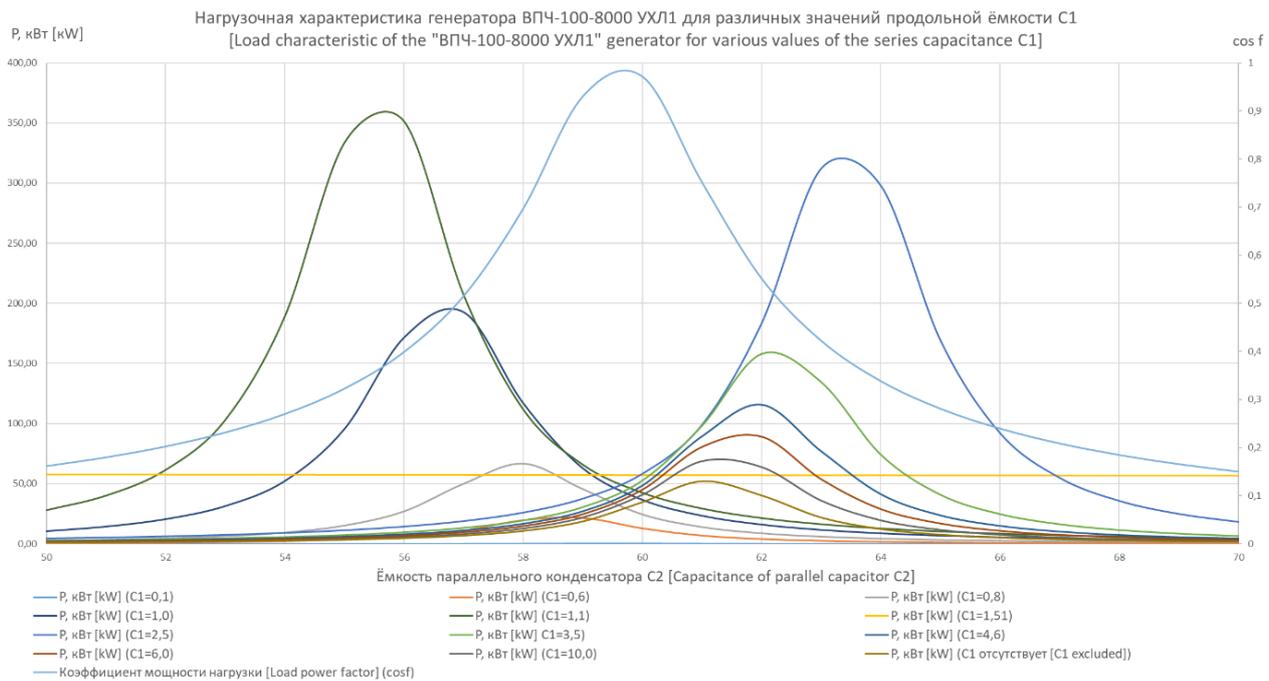


Рис. 2. Нагрузочная характеристика источника индукционного тока для различных значений величины продольной емкости при ЭДС генератора 850 В

Как видно из Рис. 2, имеется зависимость от значений параметра последовательной емкости для отдаваемой в нагрузку мощности при условии неизменности нагрузки. В режиме резонанса токов в параллельном колебательном контуре «нагрузка – параллельная емкость» (коэффициент мощности нагрузки близок к единице) значения отдаваемой в нагрузку мощности отличаются минимально и для показанного случая лежат в пределах 35–60 кВт. В случае несбалансированной нагрузки для ряда значений последовательной емкости получают опасные значения отдаваемой в нагрузку мощности (имеется в виду перегрузка источника индукционного тока).

Нетрудно заметить, что в случае возникновения резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре «внутренняя индуктивность источника – последовательная емкость» отмечается стабильность выходной мощности для произвольных значений параллельной емкости.

Таким образом, данный режим является наиболее предпочтительным для безопасной подстройки индукционной установки в условиях эксплуатации. На практике в большинстве случаев регулированию подвергается только параллельная емкость. Под безопасностью в данном случае подразумевается исключение возникновения режимов, приводящих к перегрузке генератора и нагрузки. При невозможности достижения резонанса напряжений следует выбирать значения емкости, для которых

невозможна отдача в нагрузку мощности, превышающей номинальную мощность генератора.

Однако для формирования системного подхода к настройке индукционной установки необходимо также учитывать и величины напряжений на элементах цепи (основной интерес представляют напряжение на выходе генератора под нагрузкой, значительно отличающееся от его ЭДС в режиме холостого хода, и напряжение на нагрузке).

Внешняя характеристика генератора с указанием величины напряжения на нагрузке приводится на Рис. 3.

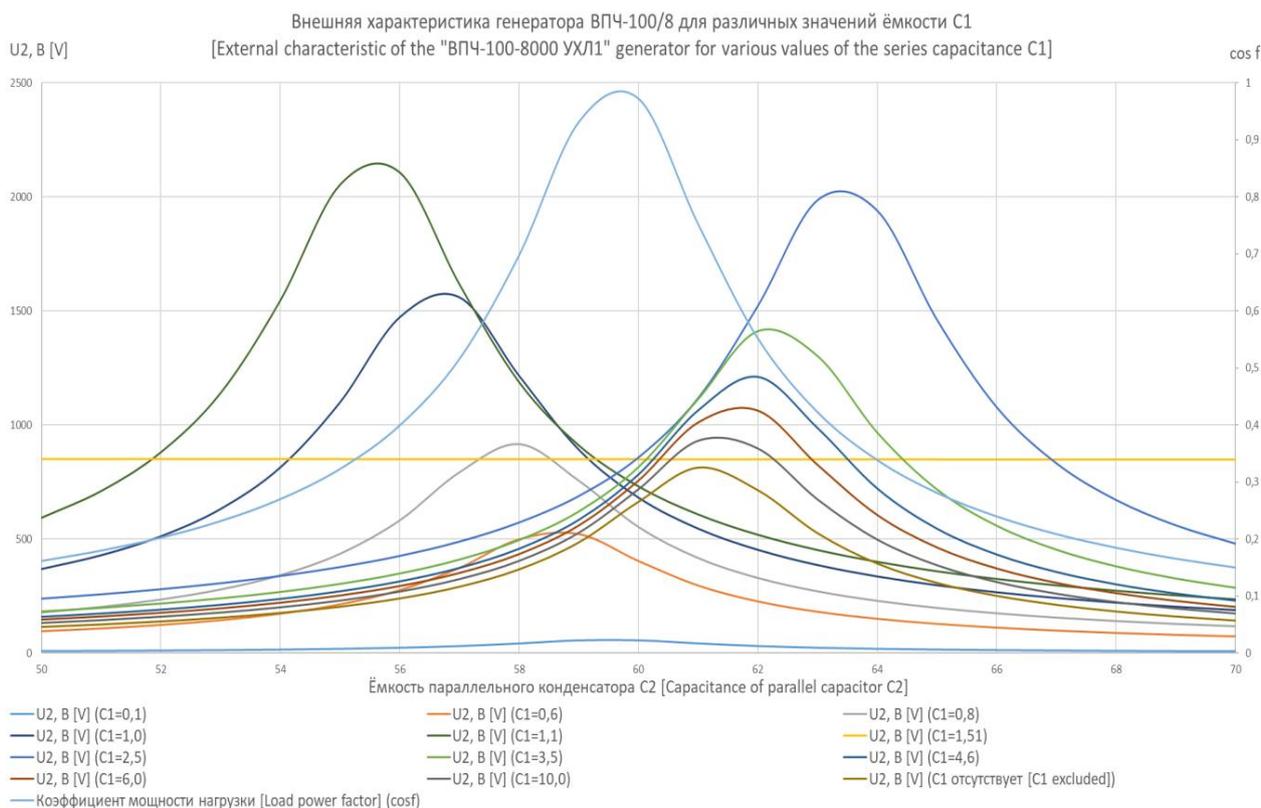


Рис. 3. Внешняя характеристика источника индукционного тока для различных значений продольной емкости (напряжение на нагрузке) при ЭДС генератора 850 В

Внешняя характеристика генератора с указанием величины напряжения на выходе генератора приводится на Рис. 4.

Как видно из Рис. 3, Рис. 4, при постоянном значении ЭДС напряжения на элементах цепи (Рис. 1) могут изменяться в широких пределах в зависимости от коэффициента мощности нагрузки, который, в свою очередь, регулируется значением параллельной емкости. Стоит отметить, что напряжение на элементах может достигать опасных значений (более 1000 В при номинальном значении для данной установки в 800 В).

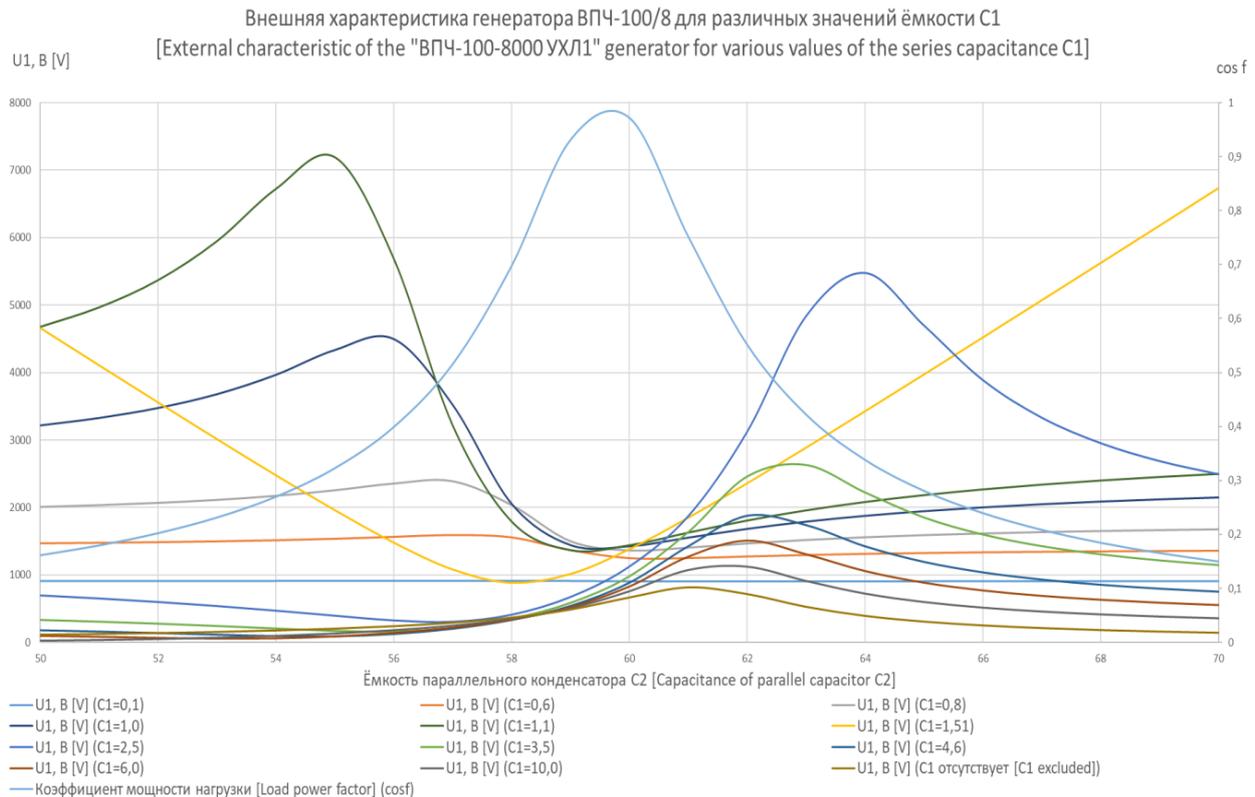


Рис. 4. Внешняя характеристика источника индукционного тока для различных значений продольной емкости (напряжение на выходе генератора) при ЭДС генератора 850 В

Нетрудно заметить, что в случае возникновения резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре «внутренняя индуктивность источника – последовательная емкость» отмечается стабильность напряжения на нагрузке для произвольных значений параллельной емкости. Значение величины напряжения на нагрузке соответствует величине ЭДС генератора. Однако данный режим неблагоприятен, так как напряжение на выходе генератора может достигать чрезвычайно высоких значений (несколько киловольт) при величинах параллельной емкости, отличающихся от резонансных на 3–5 %, что не является безопасным. Также в данном режиме отмечается превышение значением напряжения на выходе генератора значения ЭДС генератора при любых значениях параллельной емкости. Таким образом, нецелесообразно устанавливать значение продольной емкости при наличии возможности несанкционированного регулирования параллельной емкости в широких пределах.

При этом наиболее благоприятным режимом работы индукционной установки является режим, при котором обеспечивается коэффициент мощности нагрузки в пределах 0,92–0,97 индуктивного характера. В данном режиме напряжение на выходе генератора не превышает ЭДС генератора, а напряжение на нагрузке наиболее близко к ЭДС генератора и

в некоторых случаях может превышать напряжение на выходе генератора. Напряжение на последовательной емкости определяется разностью напряжений на выходе генератора и на нагрузке и в упомянутом режиме имеет минимальную величину (в широком диапазоне значений последовательной емкости).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Системный подход к регулированию и настройке режимов функционирования индукционных установок подразумевает разделение уровней настройки на общедоступный и специализированный.

Общедоступная настройка позволяет осуществить подстройку величины параллельной емкости в определенных пределах при изменении вида нагреваемой детали в индукторе (например, при использовании универсальных индукторов для ряда номенклатурных позиций).

В данном случае регулирование осуществляется однонаправленно до достижения величины коэффициента мощности нагрузки, близкого к единице.

Специализированная настройка позволяет осуществить регулирование электрических режимов в широких пределах путем изменения величин как продольной, так и параллельной емкости при изменении индуктора, способа его подключения, изменении частоты (в пределах, обеспечивающих достижимость технического результата обработки), изменении источника индукционного тока.

В данном случае регулирование осуществляется в двух направлениях:

– регулирование последовательной емкости для обеспечения возможности выдачи источником индукционного тока необходимой мощности в нагрузку и одновременного ограничения максимальной выдаваемой в нагрузку мощности;

– ограничение пределов несанкционированного регулирования параллельной емкости в пределах, обеспечивающих нахождение параметров электрической цепи (Рис. 1), таких как ток, мощность и напряжение на элементах не выше номинальных значений.

Известно, что в ходе технологического процесса индукционного нагрева заготовки (расплава) происходит изменение параметров нагрузки, а именно: снижение индуктивности нагрузки и повышение активной составляющей сопротивления нагрузки, причем снижение индуктивности нагрузки протекает быстрее.

В таком случае возможно применение трех вариаций подходов:

– при незначительном изменении параметров нагрузки (местный нагрев мелких и средних заготовок) обеспечивается возможность настройки нагрузки для поддержания коэффициента мощности выше 0,92–

0,95 в каждый момент времени на протяжении технологического процесса;

– при значительном изменении параметров нагрузки (плавка металлов, объемный нагрев крупных заготовок) обеспечивается возможность автоматического изменения величины параллельной емкости для сохранения оптимального электрического режима работы индукционной установки;

– при значительном изменении параметров нагрузки (плавка металлов, объемный нагрев крупных заготовок) обеспечивается возможность автоматического изменения рабочей частоты источника индукционного тока для сохранения оптимального электрического режима работы индукционной установки.

Например, в рамках описанного ранее эксперимента, на практике была достигнута настройка установки индукционного нагрева при использовании двух различных источников: генераторов повышенной частоты типа ВПЧ-100-8000УХЛ1 и ППЧВ-250-10,0-6000УХЛ4 с номинальной частотой 8 000 Гц и 10 000 Гц соответственно и номинальной мощностью 100 кВт и 250 кВт соответственно.

Параметры регулируемых элементов цепи (Рис. 1) для различных источников индукционного тока приведены в Табл. 3.

Таблица 3. Параметры регулируемых элементов индукционной установки

Источник индукционного тока [Induction current source]	C1, мкФ [μF]	C2, мкФ [μF]
ВПЧ-100-8000УХЛ1	4,6	59,1
ППЧВ-250-10,0-6000УХЛ4	20,0	41,0

Таким образом, при использовании данного подхода становится возможно обеспечить унификацию используемого оборудования, в основном источников индукционного тока. Наиболее эффективным решением для организации производства является централизация установок индукционного нагрева с использованием единого резервируемого источника индукционного тока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан эффективный подход к регулированию и настройке режимов работы оборудования установок индукционного нагрева. В рамках нужд электротермии повышение уровня унификации обеспечивает возможность создания централизованных участков индукционного нагрева по видам обработки (литье, термообработка, объемный нагрев) с унифицированным источником нагрева.

Экономическая эффективность описанного подхода к настройке и регулированию обеспечивается в рамках средне- и крупносерийного производства за счет обеспечения работы источника индукционного тока

при коэффициенте мощности отдаваемого тока, близком к единице и коэффициенте мощности нагрузки, близком к единице за счет того, что в рамках серийного производства потребление энергии имеет ступенчатый характер в пределах суток ввиду различной производительности смен. Повышение эффективности может быть достигнуто за счет дифференциации мощности источников с целью снижения потерь холостого хода.

Очевидно, что использование нескольких источников индукционного тока одного типа позволит при их параллельном соединении обеспечить выдачу электрической энергии повышенной частоты в широких пределах для удовлетворения текущих потребностей производства. При этом даже факт наличия нескольких однотипных единиц оборудования – источников индукционного тока позволит обеспечить высокую надежность производства в целом за счет создания возможности для формирования складских запасов унифицированных запасных частей, возможности быстрого ввода резерва и направленного обучения эксплуатационного персонала.

Также разработанный подход может использоваться при проектировании индивидуальных установок индукционного нагрева для исключения возможности создания опасных для оборудования и персонала условий эксплуатации при проведении настройки и наладки оборудования [15, 16].

Использование разработанного подхода позволит расширить представление о практических перспективах использования унифицированного системного подхода к настройке и регулированию индукционных установок повышенной частоты.

В условиях повсеместного распространения цифровых технологий применение данного подхода позволит автоматизировать процессы расчета оптимальных параметров настройки индукционных установок в условиях их проектирования и эксплуатации, что особенно актуально для предприятий-производителей и эксплуатантов оборудования.

В качестве перспектив развития выбранного направления исследования целесообразно отметить создание автоматизированного программного комплекса для расчета параметров настройки и регулирования элементов силовых цепей установок индукционного нагрева. В рамках развития промышленности и технологий в Российской Федерации это является актуальным направлением деятельности, обеспечивающим устойчивое функционирование сферы индукционного нагрева, которая с течением времени расширяет ареалы своей применимости.

**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. Демидович В.Б. История и трансформация научного и инженерного образования в области техники и технологий индукционного нагрева // Вопросы электротехнологии. – 2022. – № 2(35). – С. 5–13. [Demidovich VB Istoriya i transformatsiya nauchnogo i inzhenernogo obrazovaniya v oblasti tekhniki i tekhnologiy induktsionnogo nagreva. *Voprosy elektrotekhnologii*. 2022;2(35):5-13. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49184680> Ссылка активна на: 10.09.2022.
2. Астапчик С.А., Гурченко П.С., Шипко А.А. История и направления развития исследований и технологий индукционного нагрева в Беларуси. – Минск: Белорусская наука, 2015. – 68 с. [Astarichik SA, Gurchenko PS, Shipko AA. *Istoriya i napravleniya razvitiya issledovaniy i tekhnologiy induktsionnogo nagreva v Belarusi*. Minsk: Belorusskaya nauka; 2015. 68 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27933450>
3. Бытыгин Ю.В., Сабокарь О.С., Стрельникова В.А. Индукционный нагрев в истории и в развитии. Использование в ремонтных технологиях современного транспорта // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2017. – № 40. – С. 75–79. [Batyhin Yu, Sabokar O, Strelnikova V. Induction heating in history and development. Application in modern transport repairing technologies. *Avtomobil'nyy transport (Khar'kov)*. 2017;40:75-79. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30361846>
4. Демидович В.Б., Михлюк А.И., Вегера И.И. История и развитие промышленных технологий индукционного нагрева / Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сборник научных трудов. В 2-х книгах. Под ред. Залесского В. Г. (гл. ред.) и др. – Минск: Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, 2021. – С. 12–21. [Demidovich VB, Mikhlyuk AI, Vegera II. Istoriya i razvitiye promyshlennykh tekhnologiy induktsionnogo nagreva In Zalesskii VG, aditor. "Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov" : Sbornik nauchnykh trudov. V 2-kh knigakh. Minsk: Fiziko-tekhnicheskii institut Natsional'noy akademii nauk Belarusi; 2021. pp. 12-21. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48835582>
5. Зинин Ю., Мультменко М. Современные тиристорные преобразователи частоты типа «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. – 2015. – Т. 3. – № 54. – С. 64–71. [Zinin Yu, Mul'menko M. Sovremennyye tiristornyye preobrazovateli chastoty tipa "Parallel" dlya ustanovok induktsionnogo nagreva metallov. *Silovaya elektronika*. 2015;3(54):64-71. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23804086> Ссылка активна на: 10.09.2022.
6. Зинин Ю., Мухаметов Р., Мамаева М. Разработка установки ИНТ-400-1,0 для индукционного нагрева труб большого диаметра перед гибкой // Силовая электроника. – 2016. – Т. 5. – № 62. – С. 84–89. [Zinin Yu, Mukhametov R, Mamayeva M. Razrabotka ustanovki INT-400-1,0 dlya induktsionnogo nagreva trub bol'shogo diametra pered gibkoy. *Silovaya elektronika*. 2016;5(62):84-89. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28370402> Ссылка активна на:

- 10.09.2022.
7. Житников Д.А., Есин С.Б. Влияние ТВЧ-обработки зерна злаковых культур на параметры процесса его измельчения / Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Материалы XX Международной научно-практической конференции. 14–15 марта 2019 года, Барнаул. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2019. – С. 142–146. [Zhitnikov DA, Yesin SB. Vliyaniye TVCH-obrabotki zerna zlakovykh kul'tur na parametry protsessa yego izmel'cheniya / Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Sovremennyye problemy tekhniki i tekhnologii pishchevykh proizvodstv”. 2019 Mar 14–15, Barnaul. Barnaul: Altai State technical university named I.I. Polzunov; 2019. p. 142-146. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41569218>
  8. Кривочуров Н.Т., Ишков А.В., Иванайский А.В. Опыт использования скоростного ТВЧ-борирования для упрочнения деталей сельскохозяйственных машин, восстановленных электроконтактным напеканием железного порошка // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 11(193). – С. 111–119. [Krivochurov NT, Ishkov AV, Ivanayskiy AV. Opyt ispol'zovaniya skorostnogo TVCH-borirovaniya dlya uprochneniya detaley sel'skokhozyaystvennykh mashin, vosstanovlennykh elektrokontaktным napekaniyem zheleznogo poroshka. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020:11(193):111-119. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44277341>
  9. Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е. Повышение механических свойств композиционных гальванических покрытий обработкой // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 5. – С. 56–60. [Gur'yanov GV, Kisel' YuYe. Povysheniye mekhanicheskikh svoystv kompozitsionnykh gal'vanicheskikh pokrytiy obrabotkoy. Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2011:5:56-60. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22913432>
  10. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д., Цыдыпов Б.С. Разработка высокоскоростной технологии борирования в условиях нагрева токами // Ползуновский альманах. – 2017. – № 4–5. – С. 161–164. [Gur'yev AM, Gur'yev MA, Lygdenov BD, Tsydyrov BS. Razrabotka vysokoskorostnoy tekhnologii borirovaniya v usloviyakh nagreva tokami. Polzunovskiy al'manakh. 2017:4-5:161-164. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32538356> Ссылка активна на: 10.09.2022.
  11. Щуркин Д.О., Щелкунов А.Ю. Технологии ТВЧ в нагреве заготовок прямоугольного и квадратного сечения / Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции. 07–09 октября 2015 года, Череповец. Под ред. Кузьмина А.Л. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2015. – С. 152–153. [Shchurkin DO, Shchelkunov AYu. Tekhnologii TVCH v nagreve zagotovok pryamougol'nogo i kvadratnogo secheniya In Kuz'minov A.L editor. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Nauchno-tekhnicheskiy progress v chernoy metallurgii”. 2015 Oct 07–09, Cherepovets. Cherepovets: Cherepovetskiy gosudarstvennyy universitet; 2015. pp. 152-153. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28162127>
  12. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН // Научный вестник Новосибирского

- государственного технического университета. – 2008. – № 3(32). – С. 83–95. [Ivantsivskiy VV, Skiba VYu, Zub NP. Metodika naznacheniya rezhimov obrabotki, obespechivayushchikh ratsional'noye raspredeleniye ostatochnykh napryazheniy pri poverkhnostnoy zakalke VEN. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008:3(32):83-95. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11639712>
13. Антонцев Н.М., Гритчин В.В., Рожков Ю.Н. Получение износостойких покрытий в результате одновременного осуществления СВЧ-процессов и ТВЧ-нагрева // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124. – № 2. – С. 32–35. [Antontsev NM, Gritchyn VV, Rozhkov YuN. Polucheniye iznosostoykikh pokrytiy v rezul'tate odnovremennogo osushchestvleniya SVCH-protsessov i TVCH-nagreva. *Trudy GOSNITI*. 2016:124(2):32-35. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27208750>
14. Аулов В.Ф., Иванайский В.В., Ишков А.В. и др. Получение износостойких композиционных боридных покрытий на стали 65Г при ТВЧ-нагреве // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 139-145. [Aulov VF, Ivanayskiy VV, Ishkov AV, et al. Polucheniye iznosostoykikh kompozitsionnykh boridnykh pokrytiy na stali 65G pri TVCH-nagreve. *Trudy GOSNITI*. 2014:115:139-145. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21817350>
15. Сысун В.И., Подопригора А.В. Индукционный нагрев ферромагнитной среды в режиме насыщения // Фундаментальные исследования. – 2004. – № 3. – С. 131–133. [Sysun VI, Podoprigora AV. Induktsionnyy nagrev ferromagnitnoy sredy v rezhime nasyshcheniya. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2004:3:131-133. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=10435273>
16. Багаев А.А., Бобровский С.О. Основные положения методики косвенного измерения тока в индукторе ТВЧ-установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5(163). – С. 171–178. [Bagayev AA, Bobrovskiy SO. Osnovnyye polozheniya metodiki kosvennogo izmereniya toka v induktore TVCH-ustanovki. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018:5(163):171-178. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.09.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49371218>

#### Сведения об авторах:

**Казымов Иван Максимович**, старший преподаватель;

eLibrary SPIN: 8464-5810; ORCID: 0000-0001-6873-0315; Scopus ID: 57209794071;

E-mail: bahek1995@mail.ru

**Компанец Борис Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 7371-4290; ORCID: 0000-0001-5980-1230; Scopus ID: 57209796863;

E-mail: kompbs@mail.ru

#### Information about the authors:

**Ivan M. Kazymov**, senior lecturer;

eLibrary SPIN: 8464-5810; ORCID: 0000-0001-6873-0315; Scopus ID: 57209794071;

E-mail: bahek1995@mail.ru

**Boris S. Kompaneets**, head of department, Ph.D (Engineering);

eLibrary SPIN: 7371-4290; ORCID: 0000-0001-5980-1230; Scopus ID: 57209796863;

E-mail: kompbs@mail.ru

**Цитировать:**

Казымов И.М., Компанец Б.С. Разработка системного подхода к регулированию и настройке установок индукционного нагрева повышенной частоты для нужд электротермии // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 105–122. doi: 10.17816/transsyst202283105-122

**To cite this article:**

Kazymov IM, Kompaneets BS. Development of a systematic approach to the regulation and adjustment of high-frequency induction heating unit for the needs of electrothermy. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):105-122. doi: 10.17816/transsyst202283105-122

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

УДК [UDC] 629.053  
DOI 10.17816/transsyst202283123-141

© А.В. Киреев, Н.М. Кожемяка, Г.Н. Кононов  
АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н»  
(Новочеркасск, Россия)

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ ГРУЗОВОЙ ПЛАТФОРМЫ

**Обоснование:** В работе рассматриваются особенности построения системы управления электромагнитным подвесом грузового транспортного средства. Условия работы грузовых систем связаны с большим диапазоном изменения массы груза и скачкообразным изменением напряжения источника питания. В структуре управления системой электромагнитного подвеса содержится нелинейный неустойчивый объект (электромагнит). Эти факторы существенно усложняют процесс управления.

**Цель:** Целью работы является исследование свойств неустойчивого объекта управления для его представления эквивалентной линейной моделью, позволяющей автоматизировать процесс синтеза регулятора в программной среде MATLAB.

**Методы:** Основными методами исследования являются компьютерное моделирование, расчетные исследования, анализ результатов исследований.

**Результаты:** Предложен подход к построению адаптивной системы управления электромагнитным подвесом, основанный на синтезе линейного регулятора по эквивалентной линейной модели неустойчивого объекта.

**Заключение:** Практическая значимость состоит в том, что предложенный подход может быть использован в проектировании системы управления электромагнитным подвесом грузовой платформы.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, система управления, электромагнитный подвес, неустойчивый объект управления, адаптивный регулятор

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

© A.V. Kireev, N.M. Kozhemyaka, G.N. Kononov  
Joint-stock company “Scientific and Technical Center “PRIVOD-N”,  
(Novocherkassk, Russia)

## THE DESIGN OF THE MAGNETIC SUSPENSION CONTROL SYSTEM CARGO PLATFORM

**Background:** The paper discusses the features of building a control system for an electro-magnetic suspension of a cargo platform. The operating conditions of cargo systems are associated with a large range of changes in the mass of the cargo and an abrupt change in

the voltage of the power source. The control structure of the electromagnetic suspension system contains a non-linear unstable object (electromagnet). This greatly complicates the management process.

**Aim:** The aim of the work is to study the properties of an unstable control object for its representation by an equivalent linear model, which makes it possible to automate the process of controller synthesis in the MATLAB software environment.

**Methods.** The main research methods are computer modeling, computational studies, analysis of research results.

**Results:** An approach to the construction of an adaptive control system for an electromagnetic suspension based on the synthesis of a linear controller based on an equivalent linear model of an unstable object is proposed.

**Conclusion:** The practical significance lies in the fact that the proposed approach can be used to design a control system for the electromagnetic suspension of a cargo platform.

**Key words:** computer model, control system, electromagnetic suspension, unstable control object, adaptive controller

## ВВЕДЕНИЕ

В отличие от пассажирских магнитолевитационных транспортных систем, где масса пассажиров вносит незначительный вклад в изменение общей массы транспортного средства, грузовая система должна функционировать при кратности изменения массы груза примерно равной  $k_m = 2,5$  с заданными параметрами качества. Это порождает специфические требования к системе электромагнитного подвеса грузовой транспортной системы, связанные с большим диапазоном изменения и случайным характером массовой нагрузки. Кроме того, согласно концепции построения электротехнического комплекса грузовой магнитолевитационной транспортной системы, изложенной в [1], напряжение питания может скачкообразно изменяться при смене режимов энергоснабжения (при смене источника питания) с кратностью примерно равной  $k_U = 2$ . К тому же следует учитывать, что система электромагнитного подвеса должна отслеживать изменения профиля пути и компенсировать возникающие динамические нагрузки. В структуре управления системой электромагнитного подвеса содержится нелинейный неустойчивый объект (электромагнит). Это существенно усложняет процесс управления. Перед системой управления на первый план выдвигается задача, состоящая в стабилизации устойчивого состояния объекта, а что касается вопроса о качестве переходных процессов, то он отодвигается на второй план.

Практика проектирования, как правило, прибегает к предварительному анализу и синтезу систем по линеаризованным моделям. Это позволяет воспользоваться весьма развитыми средствами в программе MATLAB/Control System Toolbox, позволяющими автоматизировать синтез и анализ линейных стационарных систем. Далее

синтезированные линейные регуляторы проверяются на моделях нелинейных объектов. Если компьютерное моделирование системы с нелинейным объектом выявляет, что процессы не удовлетворяют требованиям, то выполняется подбор параметров линейного регулятора.

Такой подход позволяет быстро подбирать алгоритмы управления и отлаживать их на точных моделях.

Применение такого подхода к синтезу системы управления с неустойчивым нелинейным объектом осложняется тем, что для синтеза линейного регулятора необходима линейная модель объекта управления, учитывающая физическую природу процессов. Неустойчивые объекты обладает специфическими свойствами, определяемые внутренней положительной обратной связью [2]. Различные аспекты управления неустойчивыми объектами рассматриваются в ряде работ, например [3, 4].

Качество работы системы магнитного подвеса является определяющим фактором безопасности движения. Повышение качества работы системы требует более глубокого исследования физической природы объекта управления, особенности его строения и функционирования.

В работе рассматриваются особенности построения линейного регулятора для системы с нелинейным неустойчивым объектом управления. В качестве примера использована компьютерная модель одноточечной системы магнитного подвеса. В расчетных экспериментах имитировались возмущающие воздействия, связанные со скачкообразным изменением напряжение питания и изменением массы груза.

## ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

В данной работе в качестве примера рассматривается одноточечная модель электромагнитного подвеса (Рис. 1), состоящая из пассивного ферромагнитного элемента 1, закрепленного на неподвижной конструкции, и силового электромагнитного элемента с U-образным магнитопроводом 2 и обмотками 3, 4, расположенными на его полюсах. Силовой электромагнитный элемент механически соединен с грузом 6. Обмотки 3, 4 получают питание от регулируемого источника напряжения 5. Предполагается, что силовой электромагнитный элемент может перемещаться вдоль оси Z. Начало отсчета 0, совпадает с гранью полюса магнитопровода 2. Текущее значение воздушного зазора  $\delta(t)$  определяется из следующего выражения:

$$\delta(t) = z_0 - z(t), \quad (1)$$

где  $z_0$  – координата нижней грани ферромагнитного элемента 1;  
 $z(t)$  – координата перемещения силового электромагнита.

Силовое взаимодействие между пассивным электромагнитным элементом 1 и силовым элементом 2 осуществляется через воздушный зазор при подаче тока в обмотки 3, 4. В модели не учитываются упругие вибрации и динамические деформации в системе.

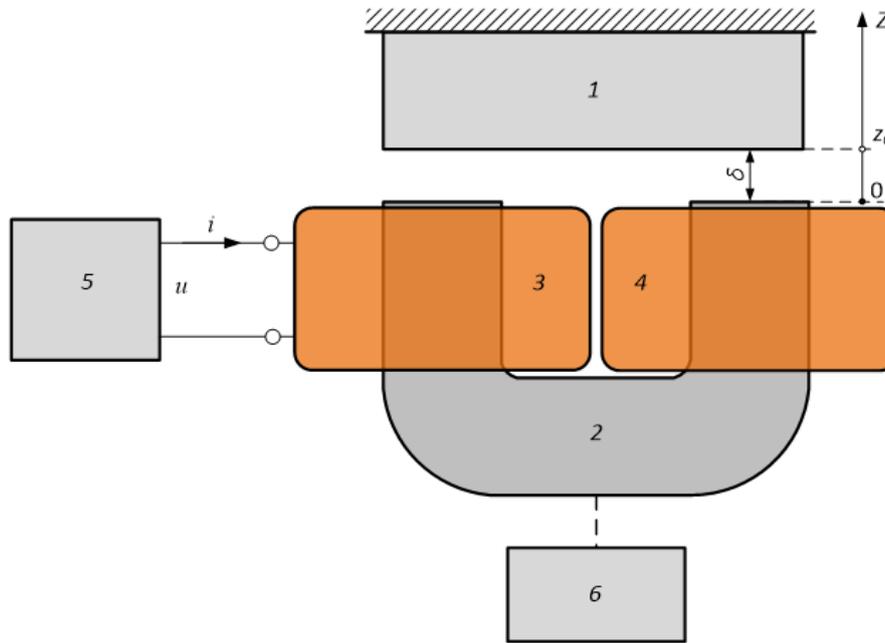


Рис. 1. Одноточечная модель электромагнитного подвеса

Процессы в одноточечной модели подвеса описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi(i(t), z(t))}{\partial i}} \cdot \left( u(t) - i(t) \cdot R - \frac{\partial \Psi(i(t), z(t))}{\partial z} \cdot \frac{dz(t)}{dt} \right) \\ \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = \frac{1}{m + M} (F_z(i(t), z(t)) - (m + M) \cdot g) \end{cases}, \quad (2)$$

- где  $u(t)$  – напряжение, прикладываемое к обмотке;  
 $i(t)$  – ток в обмотке;  
 $z(t)$  – координата перемещения;  
 $\Psi(i(t), z(t))$  – потокосцепление обмотки;  
 $R$  – активное сопротивление обмотки;  
 $F_z(i(t), z(t))$  – подъемная сила электромагнита подвеса;  
 $m$  – масса груза;  
 $M$  – масса силового электромагнита;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $t$  – время, текущее значение.

На Рис. 2 приведена Simulink-модель объекта управления. На входе  $In1$  задается значение массы груза  $m$ , а на входе  $In2$  сигнал напряжения  $u(t)$ . На выходах  $Out1$  и  $Out2$  формируются сигналы перемещения  $z(t)$  и тока  $i(t)$ . В модели зависимости  $F_z(i(t), z(t))$ ,  $\partial\Psi(i(t), z(t))/\partial i$ ,  $\partial\Psi(i(t), z(t))/\partial z$ , присутствующие в формуле (2), представлены в табличной форме.

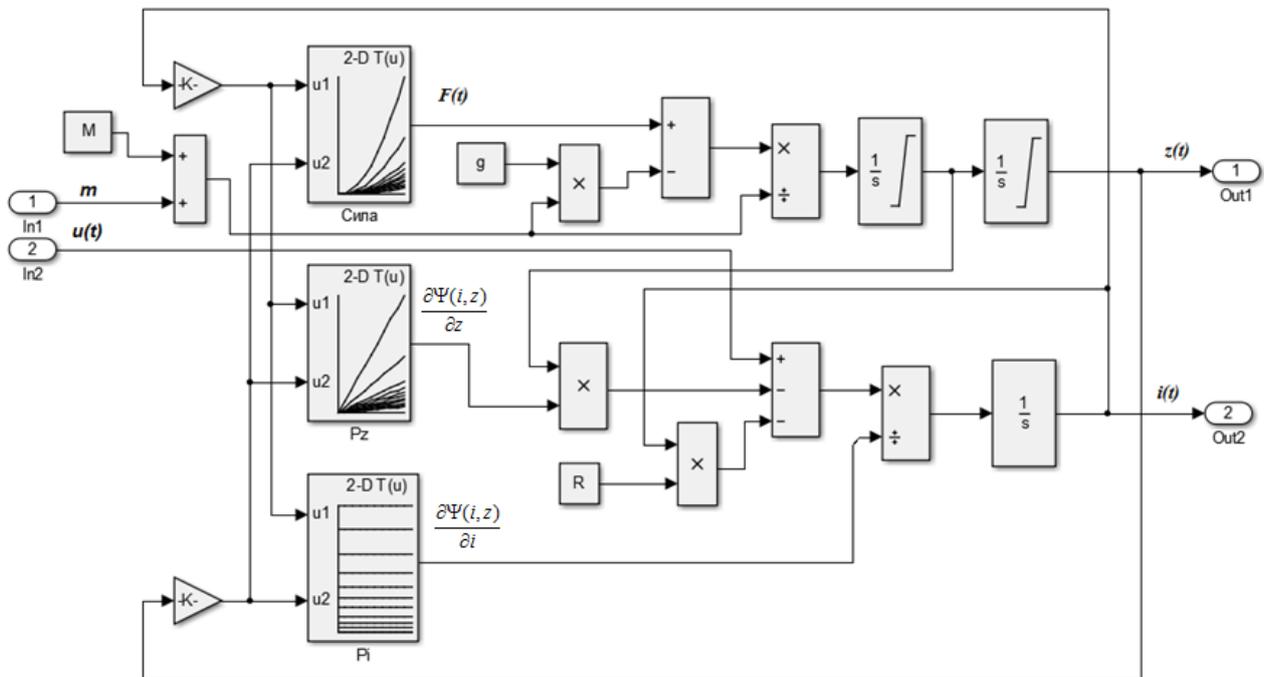


Рис. 2. Simulink-модель объекта управления

Их значения получены при проведении 3D FEM анализа на твердотельной модели объекта управления, показанной на Рис. 3а.

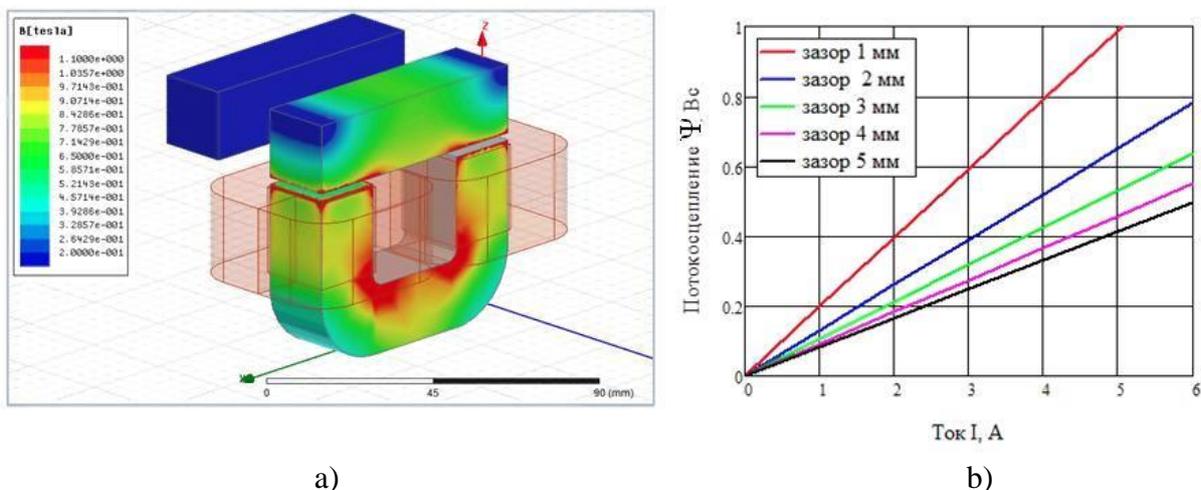


Рис. 3. Твердотельная модель объекта управления

Исходные данные, принятые при моделировании:

– магнитопровод силового элемента U-образный ленточный (Рис. 1, позиция 2) типа ПЛ20 х 20 х 40, электротехническая сталь марки 3407, толщина ленты 0,35 мм;

– пассивный ферромагнитный элемент (Рис. 1, позиция 1) квадрат калиброванный 20 х 20, сталь марки Ст.20.

На рисунке 3b приведено семейство зависимостей потокосцепления обмотки от тока и зазора  $\Psi(i, \delta)$ , рассчитанное на твердотельной модели для двух катушечной обмотки, имеющей 539 числом витков, и сопротивлением  $R = 3,622$  Ом при 20°C.

Адекватность модели реальному объекту подтверждена в работе [5].

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫМ ОБЪЕКТОМ

Для синтеза систем автоматической стабилизации в программной среде MATLAB необходимо представить объект управления в стандартной форме пространства состояний или передаточной функцией, предварительно выполнив линеаризацию исходной нелинейной системы (2). При этом процедура линеаризации неустойчивого объекта должна учитывать существенные свойства объекта.

Особенность неустойчивого объекта управления состоит в том, что свободное движение происходит без внешнего воздействия при заданном начальном состоянии (т.е. система автономна). Начальное состояние автономной системы является следствием исчезнувших внешних воздействий. Свободное движение автономных систем являются результатом процессов, происходящих в них в силу накопленной ранее энергии.

Автономность объекта управления (отсутствие внешнего воздействия) не позволяет выполнить описание его свойств в стандартной форме как реакции выхода на входное воздействие. Для преодоления данного затруднения объект управления необходимо преобразовать к эквивалентной конфигурации «вход – выход».

Обратим внимание, что начальное заданное состояние электромагнита подвеса, определяется значением тока в обмотке  $I_0$ , инициирующим переходной процесс. Воспользовавшись этим фактом, дополним модель объекта управления (Рис. 2) контуром задания начального значения тока, как показано на Рис. 4.

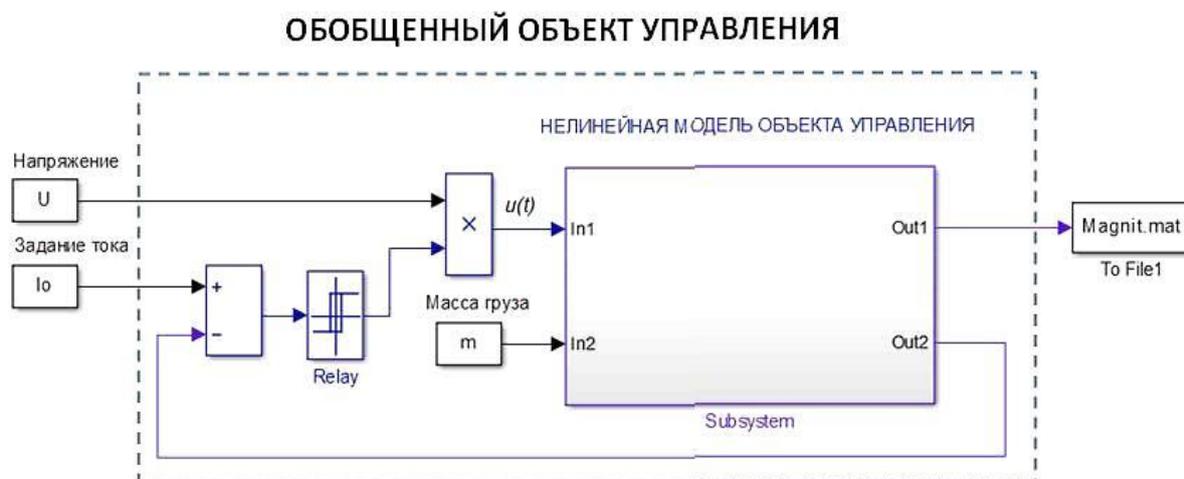


Рис. 4. Simulink-модель обобщенного объекта управления

Для задания и стабилизации начального значения тока  $I_0$  нелинейная модель объекта управления охвачена отрицательной обратной связью по току. Стабилизация тока осуществляется релейным регулятором, формирующим импульсный сигнал на входе  $In1$  подсистемы модели объекта управления. Амплитуда импульсов определяется напряжением  $U$  источника питания. Введение дополнительного контура обратной связи в модель объекта управления позволяет ввести в рассмотрение обобщенный объект управления с двумя входами по току  $I_0$  и напряжению  $U$  источника питания.

Для исследования свойств обобщенного объекта управления проведен расчетный эксперимент на Simulink-модели обобщенного объекта управления (Рис. 4). Расчетный эксперимент заключался в регистрации переходного процесса перемещении силового элемента 2 с грузом 6 при минимальном значении начального тока  $I_0$ , инициирующим переходной процесс при заданной массе груза  $m$ . Это обеспечивает протекание переходного процесса за счет энергии накопленной ранее в магнитной системе. При запуске расчетной модели параметры переходного процесса записываются в файл блоком *To File*, подключенного к выходу  $Out1$  модели объекта управления.

В ходе проведения расчетных экспериментов установлено, что обобщенный объект управления, также как и исходный, является неустойчивым. Выявлено важное свойство объекта исследований: параметры переходного процесса практически не зависят от массы груза. Например, на Рис. 5 показаны графики переходных процессов.

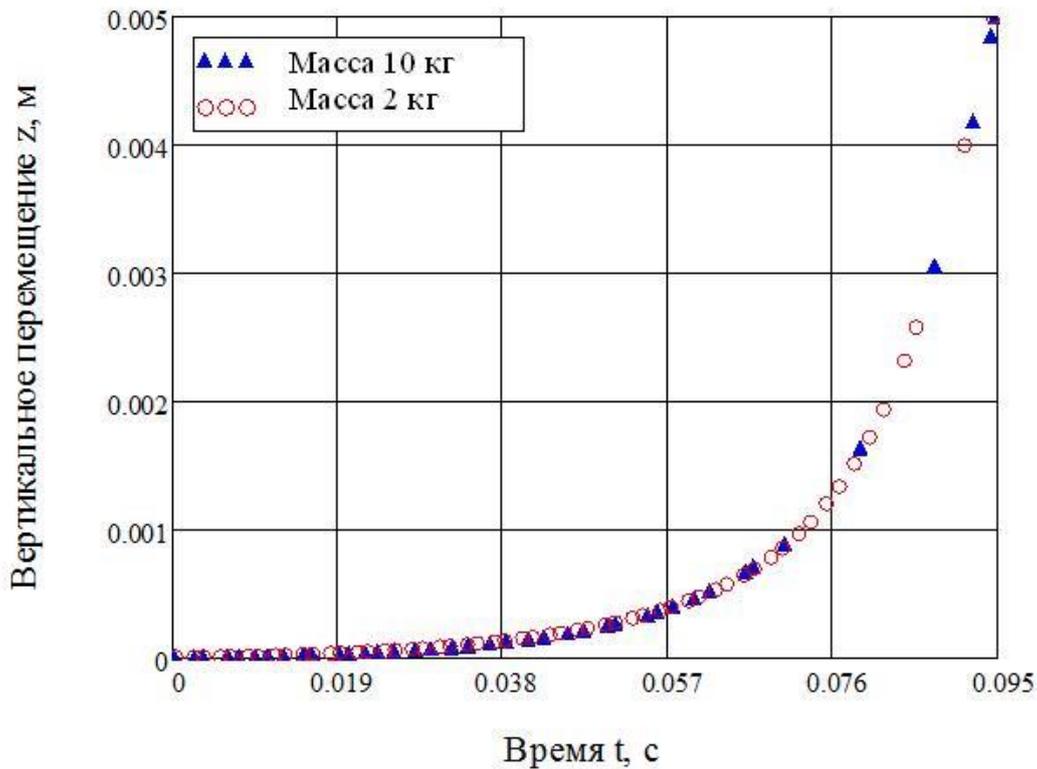


Рис. 5. Графики переходных процессов

Эксперимент проведен при:  $m = 2$  кг,  $I_0 = 2,84$  А и  $m = 10$  кг,  $I_0 = 5,24$  А. Из Рис. 5 следует, что графики переходных процессов практически совпадают. Это позволяет предположить, что структура и параметры искомой эквивалентной линейной модели обобщенного объекта могут быть неизменными в широком диапазоне изменения массы груза при соответствующей коррекции начальных условий.

Основываясь на этом предположении, найдена эквивалентная линейная модель обобщенного объекта управления в форме передаточной функции (3). Для этого выполнена идентификация обобщенного объекта по переходной характеристике [6], полученной в ходе расчетного эксперимента.

$$W(s) = \frac{1}{s^2 + 40s - 1}, \quad (3)$$

Полученная модель обобщенного объекта позволяет синтезировать линейный регулятор контура стабилизации воздушного зазора, используя приложение Control System Toolbox пакета MATLAB [7].

На Рис. 6 представлен фрагмент программы синтеза регулятора с наблюдателем состояния.

```

>> Wo = tf([1],[1 40 -1]); % Задание передаточной функции (ПФ) объекта
Wo_ss = ss(Wo); % модель объекта в форме пространства состояний
Ao = Wo_ss.A; Bo = Wo_ss.B; Co = Wo_ss.C; % Выделение матриц модели
Pr=[-40 -30]; % Назначение собственных значений системы
K = place(Ao, Bo, Pr); % Коэффициенты регулятора
Wro = tf(flplr(K),poly(Pr)); % ПФ замкнутого контура "регулятор – объект"
Pn=15*Pr; % назначение собственных значений замкнутого контура наблюдателя
L = place(Ao', Co', Pn); % Коэффициенты матрицы L наблюдателя
Wn = tf(flplr(L),poly(Pn)); % Передаточная функция замкнутого контура наблюдателя
Anr = Ao - Bo*K - L'*Co; % Выделение матриц модели
Bnr = [-L(1); -L(2)]; Cnr = [-K(1) -K(2)]; Dnr = [0];
Wnr = tf(ss(Anr,Bnr,Cnr,Dnr)) % Передаточная функция регулятора

Wnr =

      8.101e06 s + 3.243e08
      -----
      s^2 + 1080 s + 3.015e05

```

Рис. 6. Фрагмент программы синтеза регулятора

В результате расчета получена передаточная функция  $Wnr$  регулятора. Далее синтезированный линейный регулятор проверяется на модели обобщенного объекта управления. Для этого регулятор включается в замкнутый контур стабилизации зазора с обобщенным объектом управления, как показано на Рис. 7. Для сравнения процессов на Рис. 7 так же показан замкнутый контур стабилизации зазора с линейной моделью объекта управления.

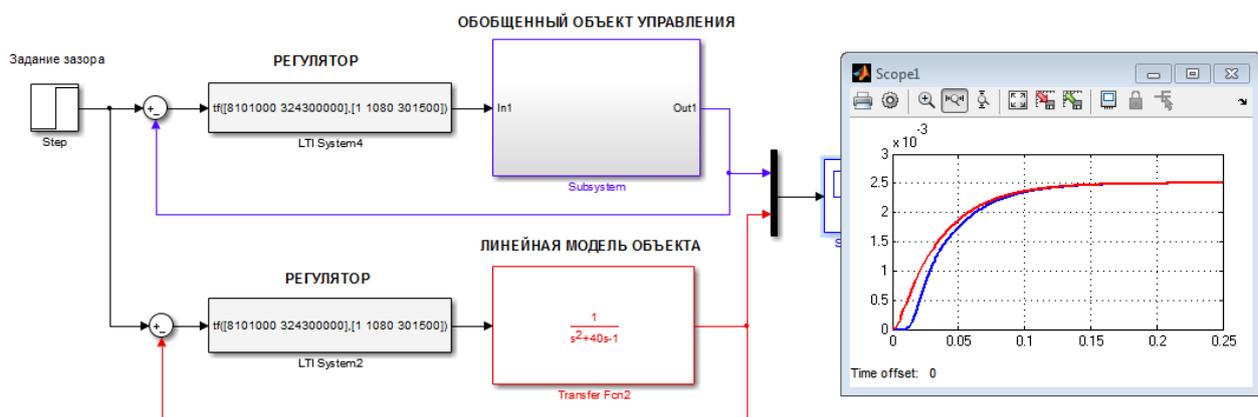


Рис. 7. Сравнение замкнутых контуров стабилизации зазора

Расчетный эксперимент, проведенный на модели (Рис. 7) показывает, что реакции замкнутых контуров на ступенчатое задание зазора практически идентичны.

Это позволяет утверждать, что подход к построению системы управления, основанный на синтезе линейного регулятора по эквивалентной линейной модели неустойчивого объекта, обеспечивает устойчивое положение равновесия нелинейного неустойчивого объекта управления с заданными показателями качества в окрестности опорной точки, задаваемой током  $I_0$ .

## ФОРМИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА

Исследование системы управления в условиях изменяющейся массы груза показало, что заданное качество регулирования обеспечивается в окрестностях рабочей точки, задаваемой током  $I_0$ . Изменение массы (при  $I_0 = const.$ ) переводит систему в новое состояние равновесия при новых значениях зазора и тока. Система при этом сохраняет устойчивость, а характер переходного процесса практически остается неизменным. Это демонстрируют осциллограммы, приведенные на Рис. 8.

С позиций теории автоматического управления это означает, что при параметрическом возмущении в системе магнитного подвеса возникает статическая ошибка по зазору. Так как масса груза может изменяться в широком диапазоне, то для компенсации возникающей ошибки целесообразно использовать методы адаптивного управления.

Формирование адаптивного регулятора начинается с выделения доступных для коррекции параметров и сигналов в основном контуре регулирования. Возможная стратегия управления состоит в подстройке параметров регулятора из условия минимизации ошибки управления (параметрическая самонастройка). Однако использование алгоритмов адаптации, корректирующих параметры регулятора основного контура, нежелательно, так как влечет за собой изменение динамических свойств системы.

В данной работе предлагается стратегия управления, связанная с введением сигнала коррекции начальных условий по току  $I_0$  (сигнальная самонастройка). В основе такого подхода лежит ранее выдвинутое предположение о том, что структура и параметры эквивалентной линейной модели неустойчивого объекта неизменны в широком диапазоне изменения массы груза при соответствующей коррекции задания начальных условий по току  $I_0$ .

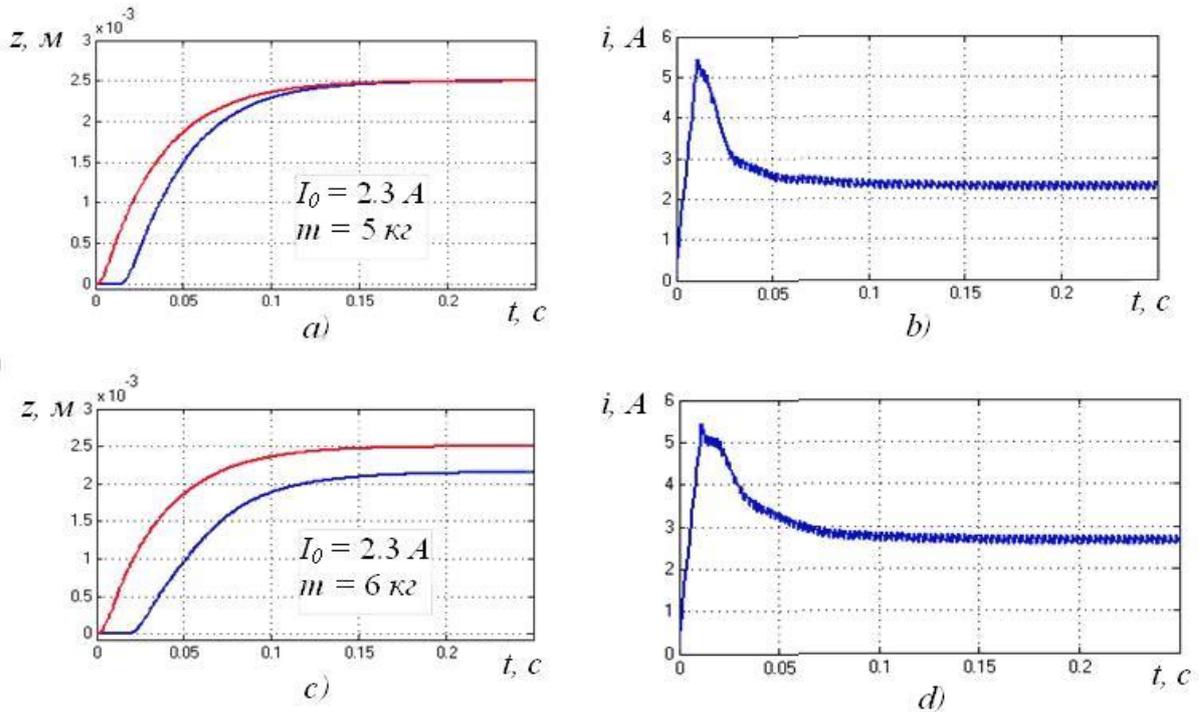


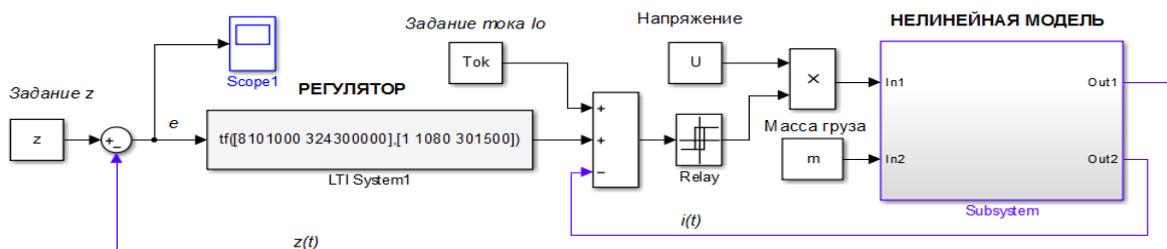
Рис. 8. Осциллограммы переходных процессов

Для реализации предлагаемой стратегии необходимо создание контура задания опорной точки (Setpoint weighting algorithm [8]). Под опорной точкой понимается точка равновесного состояния системы при равенстве подъемной силы и силы тяжести:

$$F(I_0, \delta_{зад}) = (M + m_{груза}) \cdot g, \quad (4)$$

Как следует из (4), чтобы сохранить равновесное состояние при изменении массы груза  $m_{груза}$  и неизменном значении воздушного зазора  $\delta_{зад}$ , необходимо изменить значение тока  $I_0$ . Таким образом, в качестве сигнала для настройки состояния равновесия системы, может быть выбран сигнал задания тока  $I_0$ .

Проведен расчетный эксперимент, на Simulink-модели системы стабилизации воздушного зазора с контуром задания тока  $I_0$  (Рис. 9). В ходе эксперимента задавалось значение массы груза  $m$  в диапазоне от 2 кг до 16 кг, и находилось значение тока  $I_0$ , при котором компенсировалась ошибка по зазору  $e_z$ .

Рис. 9. Simulink-модель системы управления с контуром задания тока  $I_0$

На Рис. 10 показана зависимость  $I_0 = f(m)$  при  $z = const$ ,  $U = const$ ,  $e_z = 0$ .

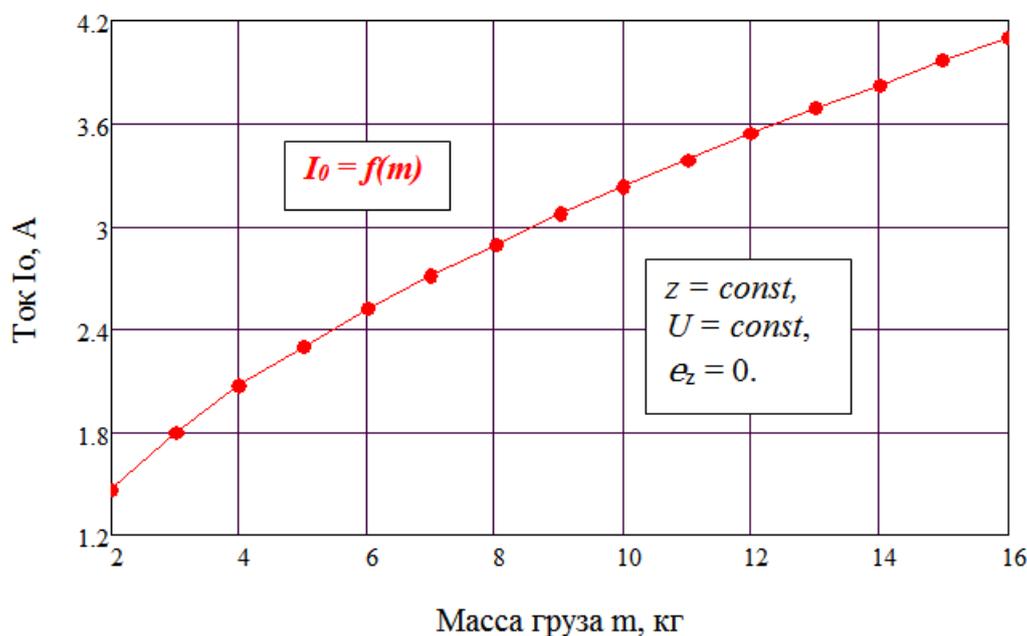


Рис. 10. График зависимости  $I_0 = f(m)$

Таким образом, результаты эксперимента доказывают возможность компенсации ошибки по зазору путем коррекции значений тока  $I_0$ . Выбор структуры адаптивного регулятора осуществлен в классе бесперебойных самонастраивающихся систем с эталонной моделью [9]. Достоинством данного класса систем является относительная простота реализации и формирование алгоритмов адаптации на основе измеряемых величин.

Как известно в системах с эталонной моделью цель управления задается с помощью эталонного значения регулируемой переменной. Для выработки эталонного значения регулируемой переменной используется специальный динамический блок – эталонная модель. Эталонная модель реализуется в виде линейной системы, формирующей желаемый отклик на задающее воздействие. Регулятор строится таким образом, чтобы замкнутая система основного контура вела себя точно так же, как эталонная модель.

В рассматриваемом примере в качестве эталонного процесса удобно принять процесс, формируемый замкнутой системой управления в номинальном режиме работы системы. В этом случае эталонной моделью может служить передаточная функция замкнутого контура системы.

На Рис. 11 представлен фрагмент программы расчета замкнутого контура (продолжение листинга программы Рис. 6).

```

Wnro = Wnr*Wo; % ПФ разомкнутого контура
W = feedback(Wnro,1) % ПФ замкнутого контура (эталонная модель)

W =
      8.101e06 s + 3.243e08
-----
s^4 + 1120 s^3 + 3.447e05 s^2 + 2.016e07 s + 3.24e08

```

Рис. 11. Фрагмент программы расчета замкнутого контура

Цель управления формируется следующим образом:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = (\lim_{t \rightarrow \infty} (y_o - y_M)) \rightarrow 0, \quad (5)$$

где  $e$  – сигнал рассогласования между выходом объекта  $y_o$  и выходом модели  $y_M$ .

В рассматриваемом случае адаптивный регулятор должен вырабатывать сигнал  $u_k$ , формируемый по интегральному закону для коррекции тока  $I_o$ .

$$u_k(t) = k \cdot \int_0^t (y_o(t) - y_M(t)) dt, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент передачи.

На Рис. 12 приведена модель системы управления магнитным подвесом с адаптивным регулятором.

В состав модели введены:

- модель задания интенсивности изменения воздушного зазора, включающая блок задания ступенчатого сигнала *Step* и аperiodическое звено *Transfer Fcn3*;
- модель регулятора основного контура *LTI Systems*;
- модель адаптивного регулятора *Subsystem 1*;
- эталонная модель *Transfer F cn1*;
- модель неустойчивого объекта управления *Subsystem*.

На Рис. 13 показана Simulink-модель подсистемы *Адаптивный регулятор*. Модель условно разделена на две части:

- схема коррекции задания тока  $I_o$ ;
- схема синхронизации запуска эталонной модели.

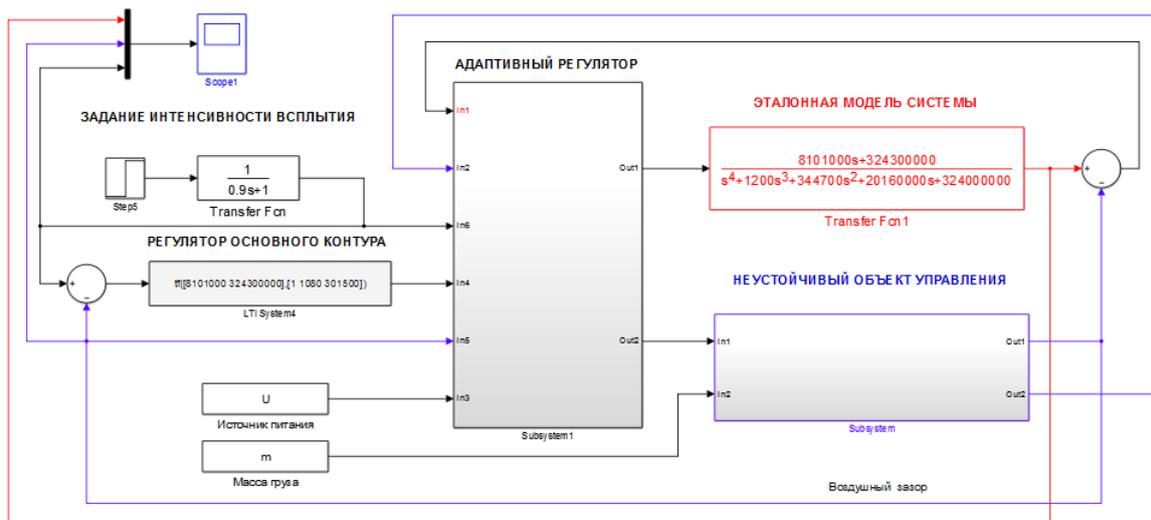


Рис. 12. Simulink-модель системы с адаптивным регулятором

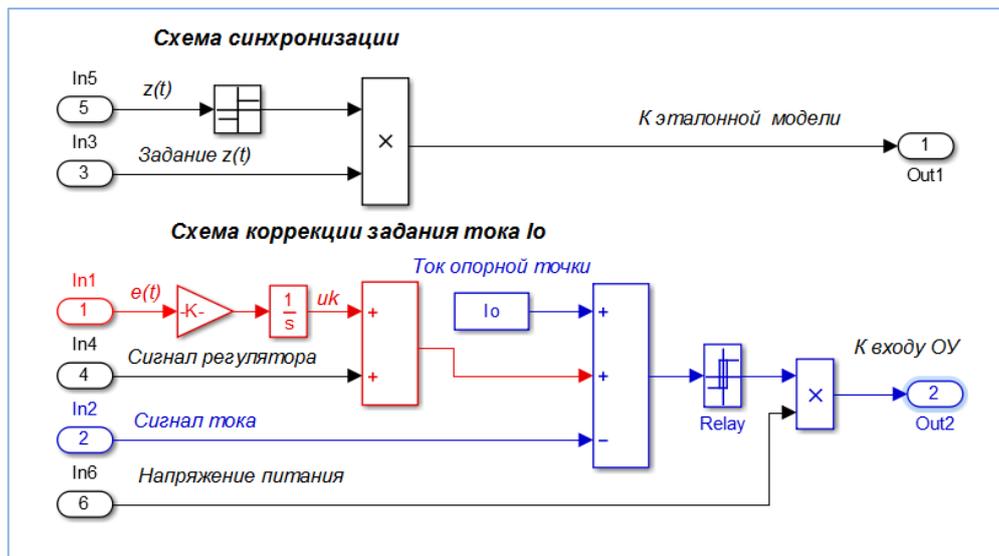


Рис. 13. Simulink-модель подсистемы Адаптивный регулятор

Схема коррекции задания тока  $I_0$  находит новое равновесное состояние системы при изменении массы груза. Для этого сигнал рассогласования  $e(t)$  между выходами эталонной модели  $u_M$  и объекта управления  $u_0$  интегрируется и подается на сумматор, где алгебраически складывается с сигналом регулятора  $u_{рег}$  основного контура системы. С выхода сумматора сигнал поступает в контур задания тока опорной точки  $I_0$  и корректирует его значение. Схема синхронизации синхронизирует процессы в эталонной модели и объекте управления.

На Рис. 14 приведены осциллограммы процессов при имитации скачкообразного изменения массы груза с  $m = 5$  кг до  $m = 10$  кг в момент времени  $t = 4$  с.

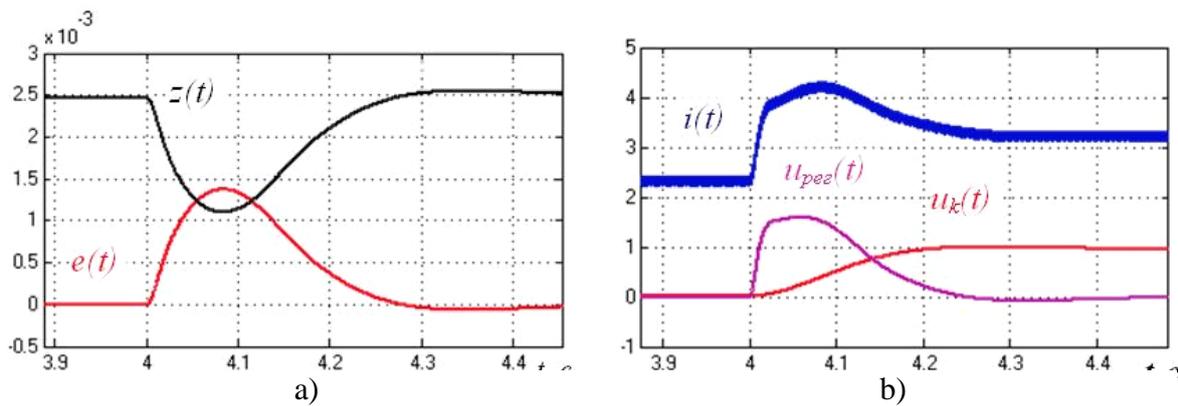


Рис. 14. Осциллограммы процессов в адаптивном регуляторе

Из осциллограмм следует, что в момент времени  $t = 4$  с величина вертикального перемещения магнита  $z(t)$  отклоняется от заданного значения. В результате чего появляется ошибка рассогласования  $e(t)$  между моделью и объектом (Рис. 14а). Это приводит к генерации сигнала управляющего воздействия  $u_{рег}$  в основном контуре регулирования и сигнала  $u_k$  коррекции тока опорной точки (Рис. 14б). Под действием сигналов управления ошибка по зазору компенсируется за счет увеличения тока  $i(t)$ . При этом система переводится в новое состояние равновесия за время  $t = 0,3$  с с момента изменения массы груза.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В работе выполнена сравнительная оценка качества регулирования систем с регулятором основного контура (Рис.7) и системы с адаптивным регулятором (Рис. 12). На Рис. 15 приведены результаты расчетных экспериментов. В качестве возмущающего воздействия задавался синусоидальный сигнал задания перемещения (черная пунктирная линия).

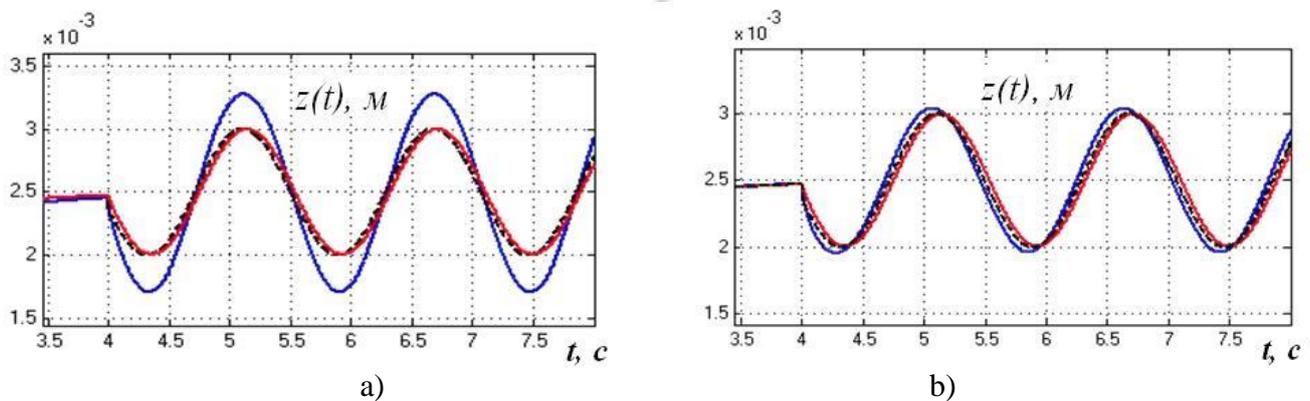


Рис. 15. Отслеживание синусоидального сигнала задания

На осциллограммах показаны:

- (Рис. 15а) сигнал на выходе модели обобщенного объекта управления (синяя линия), сигнал на выходе линейной модели объекта управления (красная линия);
- (Рис. 15б) сигнал на выходе объекта управления (синяя линия), сигнал на выходе эталонной модели (красная линия).

Из осциллограмм следует, что в системе с линейным регулятором и нелинейным объектом управления при отслеживании синусоидального сигнала задания перемещения возникает ошибка, составляющая примерно  $\varepsilon = 30\%$  от задания (Рис. 15а), а в системе с адаптивным регулятором (Рис. 15б) ошибка  $\varepsilon = 3\%$ .

Таким образом, введение в систему адаптивного регулятора существенно повышает качество процессов регулирования.

Моделирование процессов в системе при ступенчатом изменении напряжения источника питания выявило отсутствие реакции на данный тип возмущения. Это объясняется тем, что для задания и стабилизации опорного значения тока нелинейная модель объекта управления охвачена отрицательной обратной связью по току (как показано на рисунке 4). Стабилизация тока осуществляется релейным регулятором, формирующим импульсный сигнал. Амплитуда импульсов определяется напряжением  $U$  источника питания. Это делает систему не чувствительной к изменению напряжения питания. Например, на Рис. 16 показаны осциллограммы, демонстрирующие данное утверждение.

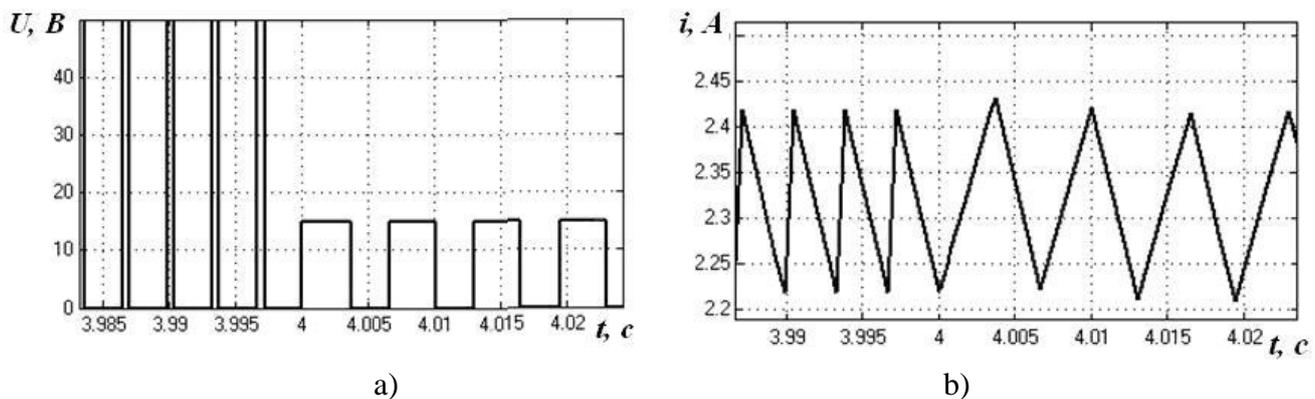


Рис. 16. Осциллограммы процессов при ступенчатом изменении напряжения

Из приведенных осциллограмм следует, что при ступенчатом изменении напряжения источника питания с  $50\text{ В}$  до  $15\text{ В}$  изменяется амплитуда и скважность импульсов напряжения (Рис. 16а). Это приводит к изменению формы тока в обмотке электромагнита подвеса (Рис. 16б), однако его среднее значение остается прежним и не влияет на состояние системы.

Таким образом, предложенная структура контура регулирования обеспечивает системе инвариантность к скачкообразным изменениям питающего напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены особенности построения системы управления электромагнитным подвесом грузового транспортного средства. Условия работы грузовых систем связаны с большим диапазоном изменения массы груза и скачкообразным изменением напряжения источника питания. В структуре управления системой электромагнитного подвеса содержится нелинейный неустойчивый объект (электромагнит). Эти факторы существенно усложняют процесс управления.

Акцентируется внимание на исследовании свойств неустойчивого объекта управления. Выявлено, что свободное движение объекта происходит без внешнего воздействия при заданном начальном состоянии.

Введен в рассмотрение обобщенный объект с дополнительным контуром обратной связи по начальному значению тока, инициирующему переходной процесс неустойчивого объекта. Исследование свойств обобщенного объекта выявило, что параметры переходного процесса практически не зависят от массы груза. Основываясь на этом свойстве, найдена эквивалентная линейная модель обобщенного объекта управления. Такой подход позволил автоматизировать процесс синтеза регулятора в программной среде MATLAB.

Результаты моделирования показали, что синтезированный линейный регулятор обеспечивает устойчивое положение равновесия системы с неустойчивым объектом в окрестности рабочей точки, задающей начальное состояние объекта. Заданное качество регулирования при изменении массы груза обеспечивается адаптивным контуром регулирования с эталонной моделью. Структура обобщенного объекта управления, обеспечивает системе инвариантность к скачкообразным изменениям питающего напряжения.

Предложенный подход может быть использован в проектировании системы управления электромагнитным подвесом грузовой платформы.

### Авторы заявляют что:

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References**

1. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Электротехнический комплекс магнитолевитационного подвижного состава // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2021. – Т. 7. – № 3. – С. 67–105. [Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Electrotechnical complex of maglev rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):67-105. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217367-105
2. Савин М.М., Пятина О.Н., Елсуков В.С. Уточнение некоторых понятий теории управления для систем с неустойчивыми звеньями // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2001. – № 2. – С. 8. [Savin MM, Pyatina ON, Yelsukov VS. Utochneniye nekotorykh ponyatiy teorii upravleniya dlya sistem s neustoychivymi zven'yami. *Bulletin of higher educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2001;2:8. (In Russ.)]. Доступно по: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33829495> Ссылка активна на: 10.08.2022.
3. Елсуков В.С., Лачин В.И., Демидов О.Ю. Синтез систем управления по выходу неминимально-фазовых нелинейных объектов с неустойчивым состоянием равновесия // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2017. – № 1(193). – С. 8–12. [Yelsukov VS, Lachin VI, Demidov OYu. Synthesis of control systems by output of non-minimally-phase nonlinear objects with unstable equilibrium state. *Bulletin of higher educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2017;1(193):8-12.(In Russ.)]. doi: 10.17213/0321-2653-2017-1-8-12
4. Стариков А.В., Лисин С.Л. Структурно-параметрический синтез систем управления неустойчивыми объектами // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. – 2013. – № 4(40). – С. 53–58. [Starikov AV, Lisin SL. Structural and parametric synthesis of unstable-object Control Systems. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2013;4(40):53-58. (In Russ., in Engl.)]. Ссылка активна на: 10.08.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289103>
5. Kireev AV, Kononov GN, Lebedev AV. Starting Operating Mode of the Combined Traction Levitation System of the Vehicle Equipped with Magnetic Suspension. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2017; 8:176-183. doi: <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v8.i1.pp176-183>
6. Сотникова М.В. Идентификация линейной модели магнитной левитации в среде MATLAB / Труды IV Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». Астрахань, 04–08 мая 2009 года / сост. И.С. Пономарева. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2009. – С. 507–522. [Sotnikova MV. Identifikatsiya lineynoy modeli magnitnoy levitatsii v srede MATLAB In: Ponomareva IS, aditor. Proceedings of the IV Russian Scientific Conference “Proyektirovaniye inzhenernykh i nauchnykh prilozheniy v srede MATLAB”. 2009 04-08 may; Astrakhan. pp. 507-522. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 10.08.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39193691>
7. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб: Лань, 2021. – 208 с. [Oshchepkov AY. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya: teoriya, primeneniye, modelirovaniye v MATLAB* (uchebnoye posobiye ). 4nd ed.

- St.Peterburg: Lan'; 2021. (In Russ)]. Ссылка активна на: 10.08.2022. Доступно по: <https://e.lanbook.com/book/177027>
8. Rajinikanth V, Latha K. Setpoint weighted PID controller tuning for unstable system using heuristic algorithm. *Archives of Control Sciences Volume 22(LVIII)*, 2012;4:481-505. doi:10.2478/v10170-011-0037-8
  9. Бейнарович В.А. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью // Журнал Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1. – С. 67–69. [Beynarovich VA. Samonastrayayushchiesya sistemy s etalonnoy model'yu. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2010;1(21):67-69. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 20.08.2022. Доступно по: <https://journal.tusur.ru/ru/arhiv/1-1-2010/samonastrayayushchiesya-sistemy-s-etalonnoy-modelyu>

#### Сведения об авторах:

**Киреев Александр Владимирович**, к.т.н., доцент;  
eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID: 0000-0003-1157-2402;  
E-mail: akireev@privod-n.ru

**Кожемяка Николай Михайлович**, к.т.н.;

eLibrary SPIN: 7921-4510; ORCID: 0000-0002-3976-7546;  
E-mail: nkozhemyaka@privod-n.ru

**Кононов Геннадий Николаевич**;

eLibrary SPIN: 9565-6740; ORCID: 0000-0002-5511-9311;  
E-mail: gkononov@privod-n.ru

#### Information about the authors:

**Alexander V. Kireev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
eLibrary SPIN: 9674-4388; ORCID: 0000-0003-1157-2402;  
E-mail: akireev@privod-n.ru

**Nikolay M. Kozhemyaka**, Candidate of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 7921-4510; ORCID: 0000-0002-3976-7546;  
E-mail: nkozhemyaka@privod-n.ru

**Gennady N. Kononov**;

eLibrary SPIN: 9565-6740; ORCID: 0000-0002-5511-9311;  
E-mail: gkononov@privod-n.ru

#### Цитировать:

Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Особенности построения системы управления магнитным подвесом грузовой платформы // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 123–141. doi: 10.17816/transsyst202283123-141

#### To cite this article:

Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. The design of the magnetic suspension control system cargo platform. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2022;8(3):123-141. doi: 10.17816/transsyst202283123-141

Рубрика 4. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

УДК [UDC] 656.025.4

DOI 10.17816/transsyst202283142-156

© С.А. Смирнов, О.Ю. Смирнова

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

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛИНИЙ ГРУЗОВОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

**Обоснование:** Транспорт является отраслью экономики, подчиняющейся общеэкономическим законам, в том числе в отношении вопросов, связанных с инвестированием в реальные активы, развитием средств производства, обеспечением расширенного воспроизводства. Наравне с этим транспорт является стратегическим сектором на государственном уровне, обеспечивая функционирование экономики в целом. В связи с этим возникают определенные противоречия, связанные с оценкой эффективности инвестиций в транспортную инфраструктуру. В большинстве случаев инвестиции в транспортную инфраструктуру оцениваются аналогично инвестициям в бизнес-проект. После выхода постановления Правительства Российской Федерации № 1512 от 26 ноября 2019 г. подход к оценке эффективности инвестиций с государственным участием расширился, однако он в полной мере не освещает вопросы эффективности проекта для государства. Наряду с этим классические методы оценки эффективности инвестиционных проектов подвержены большому субъективизму в отношении расчета социальных эффектов, вследствие чего их применимость на проектах народнохозяйственного уровня неэффективна.

**Цель:** рассмотреть перечень эффектов, возникающих при строительстве транспортной инфраструктуры, и определить методику расчета эффектов для государства.

**Материалы и методы:** методология исследования построена на анализе методов финансово-экономической оценки инвестиционных проектов, а также макроэкономических методов. Информационная база исследования опирается на официальную правовую и методическую информацию органов власти Российской Федерации.

**Результаты:** в результате исследования определен перечень эффектов для государства, возникающих при реализации проектов развития транспортной инфраструктуры, и обоснован порядок их расчета.

**Заключение:** исследование подтверждает, что используемые в настоящее время методы оценки эффективности инвестиций в инфраструктурные проекты для государства недостаточно полно и объективно отражают экономические реалии. Предложенный подход к оценке позволит осуществлять комплексную оценку социально-экономических эффектов от строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта и повысить качество управленческих решений в транспортной сфере.

**Ключевые слова:** Магнитолевитационный транспорт, оценка экономической эффективности, социально-экономические эффекты, государственная экономика, инвестиции в транспортную инфраструктуру.

Rubric 4. TRANSPORT ECONOMICS

© S.A. Smirnov, O.Yu. Smirnova

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

## FEATURES OF THE ASSESSMENT OF SOCIO-ECONOMIC EFFECTS ARISING FROM THE CONSTRUCTION OF LINES OF FREIGHT MAGLEV TRANSPORT

**Background:** Transport is a sector of the economy that is subject to general economic laws, including with regard to issues related to investing in real assets, developing means of production, and ensuring expanded reproduction. Along with this, transport is a strategic sector at the state level, ensuring the functioning of the economy as a whole. In this regard, there are certain contradictions associated with the assessment of the effectiveness of investments in transport infrastructure. In most cases, investments in transport infrastructure are valued similarly to investments in a business project. After the issuance of Decree of the Government of the Russian Federation No. 1512 dated November 26, 2019, the approach to evaluating the effectiveness of investments with state participation has expanded, but it does not fully cover the issues of project effectiveness for the state. Along with this, the classical methods for evaluating the effectiveness of investment projects are subject to great subjectivity in relation to the calculation of social effects, as a result of which their applicability to projects at the national economic level is ineffective.

**Aim:** to consider the list of effects arising from the construction of transport infrastructure and determine the methodology for calculating the effects for the state.

**Materials and methods:** the research methodology is based on the analysis of methods for financial and economic evaluation of investment projects, as well as macroeconomic methods. The information base of the study is based on the official legal and methodological information of the authorities of the Russian Federation.

**Results:** as a result of the study, a list of effects for the state arising from the implementation of transport infrastructure development projects was determined, and the procedure for their calculation was substantiated.

**Conclusion:** the study confirms that the currently used methods for evaluating the effectiveness of investments in infrastructure projects for the state do not fully and objectively reflect economic realities. The proposed approach to the assessment will make it possible to carry out a comprehensive assessment of the socio-economic effects from the construction of cargo maglev transport lines and improve the quality of management decisions in the transport sector.

**Key words:** Magnetic levitation transport, economic efficiency assessment, socio-economic effects, public economy, investment in transport infrastructure.

## ВВЕДЕНИЕ

Строительство магистральных линий транспорта является чрезвычайно капиталоемким мероприятием, требующим оценки эффективности инвестиционных вложений. В рамках проведения оценки устанавливается, насколько эффекты, полученные в результате строительства, будут покрывать инвестиции в строительство. Традиционно выделяется две группы эффектов, возникающих в результате строительства транспортной инфраструктуры – экономические и социальные [1].

Особенностью экономических эффектов является возможность их оцифровки и перевода в сопоставимые финансовые показатели. Социальные эффекты зачастую не имеют однозначной методики расчета и подвержены субъективности оценщика. Такое положение вещей приводит к общей размытости системы оценки инфраструктурных проектов, поскольку субъективизм в ожидании воплощения социальных эффектов может кардинальным образом повлиять на выводы об эффективности проекта. Безусловно, есть и обратная сторона медали: недооценка социальных эффектов приводит к отказу от проектов, не приносящих прямую финансовую выгоду от тарифных сборов, но важных в экономическом плане.

В данной статье изложены принципы оценки эффективности строительства магистральных линий с позиции государства. Очевидно, при строительстве частных линий необщего доступа целесообразно пользоваться классическими методами оценки эффективности инвестиций [2, с. 142–147]. В приоритете будут показатели экономической эффективности инвестиционного проекта или кумулятивный эффект для бизнеса в целом, возникающий в результате строительства линии транспорта. Таковым, например, может считаться увеличение объемов продаж, вызванное повышением провозной способности линии транспорта. При этом даже увеличение расходов на содержание транспортных коммуникаций будет окупаться дополнительной прибылью от основной деятельности.

Важным фактором объективности оценки является наличие комплексного показателя эффективности, отражающего вклад частных показателей в общий результат [3]. В связи с тем, что для строительства линий транспорта задействуются ресурсы, имеющие осязаемое денежное выражение, комплексный показатель должен обеспечивать сопоставимую оценку, т.е. также иметь денежное выражение.

## ЭФФЕКТЫ ОТ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛИНИЙ ГРУЗОВОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Выбор экономических эффектов должен определяться порядком их возникновения в результате реализации проекта. По этому критерию их можно разделить на четыре группы:

- прямые эффекты;
- дополнительные эффекты;
- косвенные эффекты;
- эффекты альтернативной реализации проекта.

В состав прямых эффектов включаются только те эффекты, которые генерируются непосредственно проектом в результате эксплуатации объекта инфраструктуры по его целевому назначению. Применительно к линии транспорта – это сборы за перевозки как доходная составляющая, и себестоимость эксплуатации линии как расходная составляющая. В зависимости от модели организации перевозок в качестве расходной составляющей может выступать себестоимость перевозок. Справедливость описанного подхода применима только к ситуации, когда инфраструктурный оператор является государственным органом, как например, Министерство транспорта. В том случае, если в качестве оператора выступает хозяйствующий субъект, полученный результат должен быть скорректирован до дивидендов в доле, соответствующей доле государства в уставном капитале компании.

Кроме того, прямыми эффектами являются бюджетные поступления, связанные с реализацией проекта. Состав налоговых поступлений включает прямые и косвенные налоги инфраструктурного оператора и оператора перевозок по создаваемой в результате реализации проекта инфраструктуре.

Дополнительными эффектами считаются эффекты, которые возникают в связи с реализацией проекта, но не имеют прямого отношения к целевой функции инфраструктуры. фактически – это прочие доходы от использования объектов инфраструктуры и полосы отвода. К таковым можно относить, например, доходы от прокладки линий коммуникаций сторонних организаций в части аренды земли в полосе отвода.

В отношении прямых и дополнительных эффектов необходимо осуществлять учет инвестиций в инфраструктуру, сделанных за счет всех источников финансирования, в том числе бюджетных [4, с. 86–89].

Состав косвенных эффектов включает в себя эффекты, возникающие в смежных отраслях – отраслях, поставляющих продукцию для строительства и обслуживания инфраструктуры и объектов логистики, производства и обслуживания подвижного состава.

Сущность эффектов альтернативной реализации проекта базируется на посыле о необходимости реализации инфраструктурного проекта с применением одной из транспортных технологий. Применительно к рассматриваемой проблематике актуальным является выбор транспортной технологии, альтернативной магнитолевитационной. В большинстве случаев такой альтернативой выступает железнодорожный транспорт. Содержание эффектов заключается в возникновении отраслевых последствий при отказе от альтернативного вида транспорта. В качестве положительных эффектов возникает экономия ресурсов, вызванная использованием альтернативных ресурсов на сроке жизненного цикла. Данная экономия возникает на широком многоотраслевом уровне [5, 6].

## ПОРЯДОК ОЦЕНКИ ЭФФЕКТЫ ОТ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛИНИЙ ГРУЗОВОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ ГОСУДАРСТВА

Оценка экономических эффектов осуществляется по следующему алгоритму.

### 1) Оценка прямых эффектов

Оценка должна заключаться в расчете чистого денежного потока для каждого периода горизонта планирования – срока полезного использования инфраструктуры. чистый денежный поток рассчитывается как сумма денежных потоков от операционной, инвестиционной и финансовой деятельности и отражает основную деятельность организации. В состав денежных потоков должны включаться только те денежные потоки, которые напрямую связаны с целью реализации проекта.

Учет денежных потоков необходимо осуществлять с учетом формы организации и структуры собственности инфраструктурного оператора. В том случае, если организация является хозяйственным обществом, а не унитарным предприятием, расчет денежных потоков является промежуточным этапом в связи с законодательными особенностями распоряжения имуществом хозяйствующими субъектами. Для хозяйственных обществ чистым денежным потоком по годам реализации проекта будет являться нераспределенная прибыль в доле, соответствующей доле государства в уставном капитале общества. При отсутствии государства в составе учредителей расчет чистого денежного потока неактуален. Тем не менее, необходимо производить учет государственного финансирования строительства линий в качестве отдельного элемента расчета [7, с. 449–501].

Бюджетные налоговые поступления рассчитываются независимо от формы собственности и системы реализации проекта, и состоять из суммы следующих элементов [9]:

- налог на добавленную стоимость – по материалам, оборудованию, работам и услугам, закупленным на этапах проектирования, строительства и эксплуатации линии;
- налог на прибыль – в части прибыли, уплачиваемой организацией на этапе эксплуатации линии;
- налог на имущество – в части имущества организации;
- земельный налог – в части земель, отводимых под линию транспорта на этапе эксплуатации;
- налог на доходы физических лиц – в части доходов, получаемых работниками организации на всех этапах деятельности.

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^i = (CF^i \vee D_{\text{гос}}^i) + N^i - I^i \quad (1),$$

где  $CF^i$  – чистый денежный поток в  $i$ -м периоде;

$D_{\text{гос}}^i$  – дивиденды за  $i$ -ый период в доле, соответствующей доле государства в уставном капитале;

$N^i$  – объем налоговых поступлений в  $i$ -м периоде;

$I^i$  – размер государственных инвестиций, осуществленных в  $i$ -м периоде, при условии функционирования инфраструктурного оператора в форме хозяйственного общества.

## 2) Оценка дополнительных эффектов

Содержание расчета дополнительных эффектов по своей сути аналогично расчету прямых эффектов. Различие заключается в порядке определения показателей, участвующих в расчете. Так, денежные потоки рассчитываются отдельно от перевозочной деятельности. В связи с наличием статей расходов, которые не могут быть прямо отнесены к определенному виду деятельности, их учет необходимо вести пропорционально измерителю, выбираемому в соответствии с принимаемой учетной политикой [10]. Например, пропорционально занятому по видам деятельности основному производственному персоналу, оплате труда по видам деятельности, величине прямых производственных расходов по видам деятельности и др. На наш взгляд, предпочтительнее использование подхода отнесения расходов пропорционально величине прямых производственных расходов. Для получения конечных результатов – чистого денежного потока или дивидендов, а также налогов – необходимо использование отдельного учета.

Учет инвестиций при расчете дополнительных эффектов также должен осуществляться отдельно от инвестиций, связанных с основной деятельностью.

$$\mathcal{E}_{\text{доп}}^i = (CF_{\text{доп}}^i \vee D_{\text{доп гос}}^i) + N_{\text{доп}}^i - I_{\text{доп}}^i \quad (2),$$

где  $CF_{\text{доп}}^i$  – чистый денежный поток в  $i$ -м периоде от прочих видов деятельности;

$D_{\text{доп гос}}^i$  – дивиденды за  $i$ -ый период по прочим видам деятельности в доле, соответствующей доле государства в уставном капитале;

$N_{\text{доп}}^i$  – объем налоговых поступлений от прочих видов деятельности в  $i$ -м периоде;

$I_{\text{доп}}^i$  – размер государственных инвестиций в прочие виды деятельности, осуществленных в  $i$ -м периоде, при условии функционирования инфраструктурного оператора в форме хозяйственного общества.

### 3) Оценка косвенных эффектов

Косвенные эффекты, как было отмечено ранее, возникают в смежных отраслях. Для оценки косвенных эффектов, в первую очередь, необходимо формирование бизнес-модели, определяющей отраслевую принадлежность поставщиков ресурсов на всех этапах жизненного цикла магнитолевитационной магистрали, а также объем поставляемых ресурсов [11].

Эффекты представляют собой налоговые поступления от деятельности хозяйствующих субъектов, связанной с проектированием, строительством и эксплуатацией магнитолевитационной линии. В целях определения эффектов необходимо ориентироваться на данные отраслевой статистики, а именно – на отраслевую рентабельность и структуру себестоимости продукции [12, с. 159–178].

Используя значения отраслевой себестоимости и объемов закупок продукции, работ, услуг по отраслям определяется размер налога на прибыль, подлежащего к уплате поставщиками и подрядчиками в связи с реализацией проекта. Исключение из закупочной цены затрат на оплату труда и социальный налог позволяет оценить уплачиваемый налог на добавленную стоимость. В соответствии с долей затрат на оплату труда определяется размер уплачиваемого налога на доходы физических лиц.

Общий эффект определяется суммарным значением по отраслям

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{косв}}^i = \sum_{\text{отрасли}} \left( (Z^i \times R \times \text{НП}_{\text{ст}}) + (Z^i \times R \times (1 - \alpha_{\text{перс}}) \times \text{НДС}_{\text{ст}}) + \right. \\ \left. (Z^i \times R \times \alpha_{\text{зп}} \times \text{НДФЛ}_{\text{ст}}) \right) \end{aligned} \quad (3),$$

где

$Z^i$  – объем закупок в  $i$ -м периоде по отрасли;

$R$  – отраслевая рентабельность;

$\alpha_{\text{перс}}$  – доля расходов на персонал, включая социальный налог, в отраслевой структуре расходов;

$\alpha_{зп}$  – доля расходов на персонал, включая социальный налог, в отраслевой структуре расходов;

$НП_{ст}$ ,  $НДС_{ст}$ ,  $НДФЛ_{ст}$  – ставки налогов на прибыль, на добавленную стоимость и на доходы физических лиц соответственно.

#### 4) Оценка альтернативных эффектов

Альтернативные эффекты в целях оценки следует разделить на две группы: отраслевые альтернативные эффекты и нулевые альтернативные эффекты.

Отраслевые альтернативные эффекты следует оценивать в двух ракурсах: положительные эффекты, связанные с экономией ресурсов, и отрицательные эффекты, связанные с недополучением дохода в других отраслях экономики. Например, при рассмотрении альтернатив – магнитолевитационной линии и железнодорожной линии явными положительными эффектами будут расходы на ремонт железной дороги, вместе с тем отрицательными эффектами будет потеря доходов организациями, осуществляющими ремонт, и поставщиками ресурсов для проведения ремонтных работ. Эти эффекты проявляются как на этапе строительства инфраструктуры, так и на этапе эксплуатации. Отрицательные отраслевые альтернативные эффекты оцениваются как разница между полученными налоговыми эффектами от использования магнитолевитационной технологии и налоговыми эффектами, потерянными от неиспользования альтернативной технологии. При оценке потерянных налоговых эффектов необходимо принимать во внимание неизбежность данных потерь.

Восполнимость потерь, и соответственно, исключение из расчетов достигается при соблюдении одного из нижеперечисленных условий:

- страна является нетто-импортером продукции;
- производители продукции / организации, выполняющие работы (услуги) имеют загрузку, близкую к максимальной;
- в отрасли имеется ряд проектов по расширению производственных мощностей;
- в стране реализуется значительное количество проектов по развитию транспортной инфраструктуры, требующих значительных ресурсов.

В Российской Федерации в условиях действия программ по развитию железнодорожной инфраструктуры (например, Восточного полигона) и развитию сети автомобильных дорог альтернативность использования ресурсов обеспечена на широкий горизонт планирования.

Положительные отраслевые альтернативные эффекты связаны с альтернативным использованием сэкономленных при строительстве магнитолевитационной линии ресурсов. Их оценка также связана с расчетом налоговых эффектов. Однако данные эффекты необходимо

рассчитывать по конечной продукции отрасли, в которой используются ресурсы, высвобожденные в результате строительства магнитолевитационной линии. В случае реализации программ по развитию транспортной инфраструктуры целесообразно в качестве таковых эффектов принимать налоговые эффекты, формируемые в результате ускорения реализации данных проектов.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{0AЭ}^i = \mathcal{E}_{00AЭ}^i + \mathcal{E}_{10AЭ}^i = [NЭ_{\text{маглев}}^{\text{исп}} - NЭ_{\text{альт}}^{\text{неисп}}] + [\sum NЭ_{\text{отр}}] = [NЭ_{\text{маглев}}^{\text{исп}} - \\ NЭ_{\text{альт}}^{\text{неисп}}] + \left[ \sum_{\text{кон прод}} \left( (Q^{\text{кон прод}} \times R_{\text{отр}} \times \text{НП}_{\text{ст}}) + (Q^{\text{кон прод}} \times R_{\text{отр}} \times (1 - \right. \right. \\ \left. \left. \alpha_{\text{перс}}) \times \text{НДС}_{\text{ст}}) + (Q^{\text{кон прод}} \times R_{\text{отр}} \times \alpha_{\text{зп}} \times \text{НДФЛ}_{\text{ст}}) \right) \right] \end{aligned} \quad (4),$$

где  $\mathcal{E}_{00AЭ}^i$  – отрицательные отраслевые альтернативные эффекты в  $i$ -м периоде;

$\mathcal{E}_{10AЭ}^i$  – положительные отраслевые альтернативные эффекты в  $i$ -м периоде;

$NЭ_{\text{маглев}}^{\text{исп}}$  – налоговые эффекты от использования магнитолевитационной технологии в  $i$ -м периоде;

$NЭ_{\text{альт}}^{\text{неисп}}$  – налоговые эффекты от неиспользования альтернативной транспортной технологии в  $i$ -м периоде;

$\sum NЭ_{\text{отр}}$  – сумма налоговых эффектов, связанных с использованием ресурсов, сэкономленных при строительстве магнитолевитационной линии, по отраслям в  $i$ -м периоде;

$Q^{\text{кон прод}}$  – объем производства конечной продукции;

$R_{\text{отр}}$  – рентабельность по отраслям производства конечной продукции;

$\alpha_{\text{перс}}$  – доля расходов на персонал, включая социальный налог, в отраслевой структуре расходов;

$\alpha_{\text{зп}}$  – доля расходов на персонал, включая социальный налог, в отраслевой структуре расходов;

$\text{НП}_{\text{ст}}$ ,  $\text{НДС}_{\text{ст}}$ ,  $\text{НДФЛ}_{\text{ст}}$  – ставки налогов на прибыль, на добавленную стоимость и на доходы физических лиц соответственно.

Нулевые альтернативные эффекты представляют собой эффекты, имеющие нулевую базу – отсутствие линии транспорта, удовлетворяющей спрос на перевозки. Очевидно, этот вопрос относится к макроэкономическим категориям и имеет высокое социальное значение. В отношении предпринимательской деятельности можно выделить следующие эффекты:

- рост объемов продаж – рассчитывается в объеме налоговых эффектов в соответствии с отраслевыми или корпоративными программами и планами, а также в соответствии с размером подтвержденного дефицита провозной способности;

- рост объемов закупок – рассчитывается аналогично косвенным эффектам применительно к предприятиям – бенефициарам строительства линии транспорта;
- рост занятости – рассчитывается в объеме поступлений налога на доходы физических лиц и экономии выплат по безработице на количество создаваемых рабочих мест на предприятиях (в отношении предприятий транспорта учет данного показателя входит в состав отраслевых альтернативных эффектов);
- рост доходов населения – рассчитывается в объеме налоговых эффектов, связанных с ростом спроса на потребительские товары, пропорционально структуре расходов домохозяйств по отраслям народного хозяйства.

Другой разновидностью нулевых альтернативных эффектов являются социальные эффекты. Сложность их оценки предполагает сужение возможного перечня эффектов до доказательно оцениваемых. Например, оценка экономии времени пассажиров в пути на основе средней заработной платы является спорным подходом, поскольку доказательная база того, что работник будет больше работать в случае повышения скорости маятниковой миграции и будет зарабатывать больше, отсутствует. Напротив, снижение стоимости денег, вложенных в товары в пути, в связи со снижением времени нахождения товара в пути имеет прозрачные финансовые предпосылки. Логичным является то, что на эту величину увеличится налогооблагаемая база. В связи с тем, что в большинстве случаев данное явление не приведет к снижению цен, данный эффект следует добавлять к эффектам от предпринимательской деятельности.

В отношении чисто социальных эффектов при объективном расчете следует избегать популистской риторики в отношении роста благ для населения. Подобное состояние достижимо посредством реализации государственной политики с целенаправленным использованием государственных финансов, основным источником пополнения которых являются налоговые поступления и доходы от государственного предпринимательства. Государственная политика, в свою очередь, не зависит от реализации или не реализации инфраструктурного транспортного проекта. Поэтому подход к определению социальных эффектов должен носить утилитарный характер. И именно, в связи с этим большая часть эффектов включается в группу эффектов от предпринимательской деятельности. Таким образом, состав социальных эффектов определяется следующими составляющими:

- улучшение здоровья населения – оценивается посредством снижения выплат из фондов медицинского страхования в соответствии с доказанным влиянием транспорта на здоровье населения;
- повышение производительности труда – оценивается посредством роста сбора налога на доходы физических лиц в связи со снижением доли выплат по больничным листам в соответствии с доказанным влиянием транспорта на здоровье населения.

$$\mathcal{E}_{\text{НАЭ}}^i = \mathcal{E}_{\text{НАЭПД}}^i + \mathcal{E}_{\text{НСАЭ}}^i = [\text{НЭ}_{\text{ОП}} + \text{НЭ}_{\text{ОЗ}} + \text{НЭ}_3 + \mathcal{E}_{\text{ПБ}} + \text{НЭ}_{\text{ДН}} + \text{НЭ}_{\text{СД}}] + [\text{ФОМС}^{\text{сниж}} + \text{ПТ}^{\text{НДФЛ}}] \quad (5),$$

где

$\mathcal{E}_{\text{НАЭПД}}^i$  – нулевые альтернативные эффекты от предпринимательской деятельности в  $i$ -м периоде;

$\mathcal{E}_{\text{НСАЭ}}^i$  – нулевые социальные альтернативные эффекты в  $i$ -м периоде;

$\text{НЭ}_{\text{ОП}}$  – налоговые эффекты от роста объемов продаж в  $i$ -м периоде;

$\text{НЭ}_{\text{ОЗ}}$  – налоговые эффекты от роста объемов закупок в  $i$ -м периоде;

$\text{НЭ}_3$  – налоговые эффекты от роста занятости в  $i$ -м периоде;

$\mathcal{E}_{\text{ПБ}}$  – экономия по выплатам пособий по безработице в  $i$ -м периоде;

$\text{НЭ}_{\text{ДН}}$  – налоговые эффекты от роста доходов населения в  $i$ -м периоде;

$\text{НЭ}_{\text{СД}}$  – налоговые эффекты от снижения издержек на обслуживание капитала, вложенного в товары в пути, в  $i$ -м периоде;

$\text{ФОМС}^{\text{сниж}}$  – снижение объемов выплат из фонда обязательного медицинского страхования в  $i$ -м периоде;

$\text{ПТ}^{\text{НДФЛ}}$  – эффекты от повышения производительности труда в  $i$ -м периоде.

Немаловажным с точки зрения государственной экономики является национальная принадлежность поставщиков элементов транспортной технологии [13]. С экономической точки зрения ключевым здесь является вопрос репатриации прибыли иностранных предприятий. В таком случае национальная экономика фактически лишается части денежных средств, которые могут быть инвестированы в разнообразные проекты. Поскольку направление такого инвестирования не определено, целесообразно рассматривать в размере, эквивалентном величине налога на прибыль, уплачиваемого по нерепатрируемой прибыли (соответствует чистой прибыли предприятия) в соответствии с рентабельностью, установленной на уровне ключевой ставки ЦБ РФ.

$$\mathcal{E}_{\text{НРП}}^i = \text{ЧП}_{3\text{П}}^i \times R_{\text{СТ}} \times \text{НП}_{\text{СТ}} \quad (6),$$

где

$\text{ЧП}_{3\text{П}}^i$  – чистая прибыль зарубежных предприятий-поставщиков в  $i$ -м периоде;

$R_{ст}$  – ключевая ставка в  $i$ -м периоде;

$НП_{ст}$  – ставка налога на прибыль.

Отдельным вопросом является возможное изменение величины тарифов при внедрении магнитолевитационного транспорта. По различным оценкам себестоимость перевозок магнитолевитационным транспортом может быть ниже аналогичного показателя для железнодорожного транспорта. В данном случае очевидно, что магнитолевитационный транспорт имеет большие перспективы для государственного тарифного регулирования. Следовательно, тарифообразование будет построено на основе экономически обоснованных затрат. В связи с этим эффекты должно определяться с учетом прогнозного уровня тарифов для магнитолевитационного транспорта.

Другим важнейшим вопросом является проблема дисконтирования денежных потоков. Для государства, в отличие от коммерческих организаций, вопрос средневзвешенной цены капитала или альтернативного использования денег не является актуальным. Напротив, актуальным является стоимость государственных расходов, зависящая от инфляции в отношении продукции и услуг отечественного происхождения и совокупности инфляции и колебаний валютного курса в отношении продукции и услуг зарубежного происхождения.

$$n = I_0^i \times \alpha + I_3^i \times \eta \times \beta \quad (7),$$

где

$I_0^i$  – инфляция по отечественной продукции и услугам в  $i$ -м периоде;

$\alpha$  – доля отечественной продукции и услуг в государственных расходах в  $i$ -м периоде;

$I_3^i$  – средневзвешенная инфляция по зарубежной продукции и услугам по странам-поставщикам в  $i$ -м периоде;

$\eta$  – средневзвешенное изменение курса национальной валюты к курсам валют стран-поставщиков в  $i$ -м периоде;

$\beta$  – доля зарубежной продукции и услуг в государственных расходах в  $i$ -м периоде.

Для таких прорывных технологий, как магнитная левитация, большим соблазном является включение в состав эффектов развитие инновационных производств и отраслей промышленности. Однако данный вид эффектов представляется чрезвычайно размытым для оценки и чрезвычайно спорным при включении его в расчет эффективности строительства второй, третьей и т.д. линии. Большая часть составляющих его элементов уже включена в расчет, и нет необходимости в поиске и выделении дополнительных эффектов [14, 15].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие транспортной инфраструктуры является одной из основ дальнейшего развития экономики России. И, как и ранее, важнейшую роль в осуществлении инвестиций в транспортную инфраструктуру будет играть государство. В связи с этим целесообразно в кратчайшие сроки модернизировать действующий методический аппарат для оценки эффективности инвестиций в транспортную инфраструктуру для государства. Только при выполнении данного условия возможно добиться комплексного рассмотрения эффективности проектов, включая выбор определенного вида транспорта, показывающего наивысшую эффективность в определенных условиях.

Ни одна из разработанных на сегодняшний день моделей оценки эффективности инвестиций в транспортную инфраструктуру не обладает полнотой и объективностью в должной степени. Оценка эффективности строительства линий магнитолевитационного и любого другого вида транспорта должна рассматривать максимально возможный перечень непротиворечиво оцифровываемых эффектов. Данный подход успешно реализован в настоящей статье.

### 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. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Оценка эффективности видов наземного транспорта для массовых грузовых перевозок // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 204–220. [Smirnov SA, Smirnova OY. Evaluation of effectiveness of different transport modes for regular mass freight transportation. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):204-220. (In Russ., In Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734204-220
2. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т. / под ред. И.П. Киселева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2020. – Т. 1. – 428 с. [Kiselev IP, ed. *Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obshchij kurs: ucheb. posobie: v 2 t. 2-e izd., pererab. i dop.* Moscow: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte; 2020. T.1. 428 p. (In Russ.)]. ISBN 978-5-907206-40-3
3. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. «Российский Маглев» в единой транспортной системе страны // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С.124–134. [Smirnov SA, Smirnova OY. Russian Maglev in integrated transport system. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(2):124-134. (In Russ.)]. doi:10.17816/transsyst202282124-134

4. Белозеров В.Л., Ефанов А.Н., Зайцев А.А. и др. Экономика транспорта: управление в рыночных условиях: монография / под ред. О. В. Белого. – СПб: Изд-во «Наука», 2014. – 204 с. [Belozerov VL, Efanov AN, Zajcev AA, et al. Ekonomika transporta: upravlenie v rynochnyh usloviyah: monografiya. Bely OV, editor. St. Petersburg: Nauka; 2014. 204 p. (In Russ.)].
5. Зайцев А.А. Социализация общественного транспорта в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 3. – С. 4–17. [Zaitcev AA. Socialization of public transport in the new technological paradigm. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(3):4-17 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst2019534-17
6. Глазьев С.Ю. Великая цифровая революция: вызовы и перспективы для экономики XXI века. [Glaz'yev SYu. Velikaya tsifrovaya revolyutsiya: vyzovy i perspektivy dlya ekonomiki XXI veka. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 19.09.2022. Доступно по: <https://glazev.ru/articles/6-jekonomika/54923-velikaja-tsifrovaja-revoljutsija-vyzovy-i-perspektivy-dlja-jekonomiki-i-veka>
7. Акулов М.П. Пассажи́рский комплекс железных дорог: Монография. – СПб.: Издательство ООО Типография «НП-Принт», 2014. – 464 с.
8. Верховых Г.В. Зайцев А.А., Котенко А.Г. и др. Железнодорожные пассажирские перевозки: монография / под ред. Г.В. Верховых. – СПб: Северо-Западный региональный центр «РУСИЧ», «Паллада-медиа», 2012. – 520 с. [Zaitcev AA, Verkhovykh GV, Kotenko AG, et al. *Zheleznodorozhnye passazhirskie perevozki (monograph)*. St. Petersburg: Northwest Regional Center “RUSICH”, “Pallada-Media”, 2012. (In Russ.)].
9. Налоговый кодекс Российской Федерации. Часть первая. Принят государственной думой 16 июля 1998 года. Одобрен Советом Федерации 17 июля 1998 года. [Nalogovyy kodeks Rossijskoj Federacii. CHast' pervaya. Prinyat gosudarstvennoj dumoj 16 iyulya 1998 goda. Odobren Sovetom Federacii 17 iyulya 1998 goda. (In Russ.)]. Доступно по: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102054722> Ссылка активна на: 19.09.2022.
10. Федеральный стандарт бухгалтерского учета ФСБУ 5/2019 «Запасы». Утвержден приказом Минфина России от 15.11.2019 № 180н. [Federal'nyj standart buhgalterskogo ucheta FSBU 5/2019 «Zapasy». Uтверzhden prikazom Minfina Rossii ot 15.11.2019 № 180n. (In Russ.)]. Ссылка активна на 19.09.2022. Доступно по: [https://minfin.gov.ru/ru/document/?id\\_4=133539-federalnyi\\_standart\\_buhgalterskogo\\_ucheta\\_fsbu\\_52019\\_zapasy](https://minfin.gov.ru/ru/document/?id_4=133539-federalnyi_standart_buhgalterskogo_ucheta_fsbu_52019_zapasy)
11. Методика оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот. Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2019 г. № 1512. [Metodika ocenki social'no-ekonomicheskikh effektivov ot proektov stroitel'stva (rekonstrukcii) i ekspluatatsii ob"ektov transportnoj infrastruktury, planiruemyh k realizacii s privlecheniem sredstv federal'nogo byudzheta, a takzhe s predostavleniem gosudarstvennyh garantij Rossijskoj Federacii i nalogovyh l'got. Uтверzhdena postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 26 noyabrya 2019 g. № 1512. (In Russ.)]. Ссылка активна на 19.09.2022. Доступно по: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201912030009>

12. Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. Статистические методы анализа: [учеб. пособие] М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 300 с. [Shorohova IS, Kislyak NV, Mariev OS. Statisticheskie metody analiza: [ucheb. posobie] M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Ural. feder. un-t. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2015. 300 p. (In Russ.)]. ISBN 978-5-7996-1633-5
13. Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях развития России до 2030 года»: от 21.07.2020 № 474 [Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii “O natsional’nykh tselyakh razvitiya Rossii do 2030 goda: utv. Rasporyazheniyem Pravitel’sтва Rossiyskoy Federatsii: ot 21.07.2020 g. № 474. [Internet]. (In Russ)]. Доступно по: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf> Ссылка активна на: 19.09.2022.
14. Витте С.Ю. Принципы железнодорожных тарифов по перевозке грузов. – СПб: ПГУПС, 1999. – 364 с. [Vitte SYu. Principi jeleznodorojnykh tarifov po perevozke gruzov. St. Petersburg: PGUPS, 1999. 364 p. (In Russ.)].
15. Терешина Н.П., Галабурда В.Г., Трихунков М.Ф. и др. Экономика железнодорожного транспорта / под ред. Н.П. Терешиной, Б.М. Лapidуса, М.Ф. Трихункова. – М: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2006. – 801 с. [Tereshina NP, Galaburda VG, Trikhunkov MF. Ekonomikajeleznodorojnogo transporta. TereshinaNP, GalaburdaVG, Trikhunkov MF, editors. Moscow: Uchebno-metodicheskii centr po obrazovaniyu na jeleznodorojnom transporte, 2006. 801p. (In Russ.)].

#### Сведения об авторах:

**Смирнов Сергей Александрович**, ведущий научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Смирнова Ольга Юрьевна**, старший научный сотрудник;

eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

#### Information about the authors:

**Sergei A. Smirnov**, Leading Researcher;

eLibrary 3042-2910; ORCID: 0000-0002-2096-6967;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

**Olga Yu. Smirnova**, Senior Researcher;

eLibrary SPIN: 9083-2984; ORCID: 0000-0002-2239-4384;

E-mail: noc-pgups@yandex.ru

#### Цитировать:

Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Особенности оценки социально-экономических эффектов, возникающих в результате строительства линий грузового магнитолевитационного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 142–156. doi: 10.17816/transsyst202283142-156

#### To cite this article:

Smirnov SA, Smirnova OYu. Features of the assessment of socio-economic effects arising from the construction of lines of freight maglev transport. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2022;8(3):142-156. doi: 10.17816/transsyst202283142-156

2022;8(3)

Электронный

оригинал-макет

подписан к публикации

30.09.2022

156 страницы Ф А4

сверстан в редакции ПГУПС

190131, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 9