



ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 81, №2. 2022

1942 **80** 2022
Юбилейный выпуск

80 ЛЕТ ЖУРНАЛУ

Научный рецензируемый журнал **«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / Russian Railway Science Journal»** рад приветствовать читателей, авторов и рецензентов на страницах своего издания.

Журнал ведет свою историю с 1942 г. и первоначально носил название «Техника железных дорог» (до 1956 г.). Уже на протяжении 80-ти лет журнал непрерывно развивается, следуя вызовам времени и новым задачам и сохраняя при этом свою уникальность. С момента создания и до настоящего времени сотрудники редакции журнала стремятся поддерживать высокий уровень российской железнодорожной науки.

Развитие отрасли во многом зависит от инженеров и ученых, которые раскрывают результаты своих передовых исследований в публикациях авторитетного научно-технического журнала. Это в свою очередь содействует прорывным изменениям в транспортных технологиях и технических средствах железных дорог. Сохраняя исторические традиции ведущего научно-технического периодического издания отрасли, журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / Russian Railway Science Journal» в то же время стремится стать не только всероссийской, но и международной площадкой для популяризации актуальных научных исследований. Трансформация передового российского научно-технического журнала в глобальное издание послужит развитию всей транспортной отрасли.

Журнал в настоящее время индексируется в наиболее значимых российских и международных базах данных, а также входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата или доктора наук. Статьям, опубликованным в журнале, присваиваются уникальные идентификаторы DOI и EDN. Контроль качества и поддержание научного уровня публикаций обеспечиваются действующей системой двухстороннего слепого рецензирования всех поступающих в редакцию материалов с привлечением ведущих ученых отрасли, представляющих различные научные и образовательные организации.

Страницы нашего издания всегда открыты для авторов, которые серьезно занимаются транспортной наукой и успешно решают приоритетные задачи развития железных дорог.



ПРЕВРАЩАЕМ НАУКУ В РЕЗУЛЬТАТ!

<https://www.journal-vniizht.ru>

ISSN 2223-9731 (Print)
ISSN 2713-2560 (Online)
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 81, № 3. 2022

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

Адрес учредителя и редакции:
129626, Российская Федерация,
Москва, 3-я Мытищинская ул., 10
Тел.: +7 (495) 602-80-37, 602-81-10

Издатель:
Издательский дом «ИПП «КУНА»,
125167, Российская Федерация,
Москва, Ленинградский пр., д. 47, стр. 4
Тел. +7 (495) 795-02-97

Издается с 1942 г.
Периодичность: 4 номера в год
Подписной индекс: 70116
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-83067 от 11.04.2022

Founder:
Railway Research Institute

Founder and editorial address:
129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.,
Russian Federation
Tel.: +7 (495) 602 8037, 602 8110

Publisher:
JSC "IPP "KUNA",
125167, Moscow, 47, bldg. 4, Leningradskiy Ave.,
Russian Federation. Tel.: +7 (495) 795 0297

Published since 1942
Periodicity: Quarterly
Subscription index: 70116
Registration Certificate
PI No. FS77-83067. 11.04.2022

www.journal-vniizht.ru
journal@vniizht.ru

© АО «ВНИИЖТ», 2022

Цель журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» — публикация результатов передовых научных исследований в области совершенствования транспортных, информационных технологий и технических средств железнодорожного транспорта. Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам железнодорожной и машиностроительной отраслей, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами развития железнодорожного транспорта.

Научный рецензируемый журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные статьи, ранее не публиковавшиеся в других изданиях.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.5.2. Машиноведение (технические науки)

2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

2.6.17. Материаловедение (технические науки)

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

05.22.01. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки, до 16.10.2022)

ЖУРНАЛ ИНДЕКСИРУЕТСЯ И АРХИВИРУЕТСЯ В:

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)



Международной справочно-библиографической системе EBSCO



Китайской платформе наукометрических данных Baidu



Международной реферативной базе Ulrichsweb Global Serials Directory



Международной базе открытых публикаций Google Академия



Международной электронно-библиотечной системе The European Library



Электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН



Международной базе Dimensions



ЖУРНАЛ ЯВЛЯЕТСЯ ЧЛЕНОМ

Директории журналов открытого доступа (DOAJ)



Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ)



Агентства регистрации цифровых идентификаторов (CrossRef)



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, авторское право на статьи – авторам

The purpose of the Russian Railway Science Journal is to publish the results of research insights in the field of improving transport and information technologies and technical means of railway transport. The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners of the railway and engineering industries, as well as to a wide range of readers interested in the problems of railway transport development.

The scientific peer-reviewed Russian Railway Science Journal publishes original scientific articles, which have not been previously published.

The journal provides direct open access to full text issues — open access to research results contributes to the increase of global knowledge sharing.

The Russian Railway Science Journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals published by the Attestation Commission in which major research results from dissertations of Candidate of Science and Doctor of Science degrees are to be published. Scientific specialties and corresponding branches of science are:

- 2.5.2. Machine science (technical sciences)
- 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences)
- 2.6.1. Metal science and heat treatment of metals and alloys (technical sciences)
- 2.6.17. Materials science (technical sciences)
- 2.9.2. Railway track, survey and design of railways (technical sciences)
- 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification (technical sciences)
- 2.9.4. Transportation process management (technical sciences)
- 05.22.01. Transport and transport technological systems of the country, its regions and cities, organisation of the transport production (technical sciences, till 16.10.2022)

THE JOURNAL IS INDEXED AND ARCHIVED IN:

Russian Science Citation Index



EBSCO Information Services



Baidu



Ulrichsweb Global Serials Directory



Google Scholar



The European Library



Russian Institute for Scientific and Technical Information
(VINITI RAS)



Dimensions



THE JOURNAL IS A MEMBER OF

the Directory of Open Access Journals (DOAJ)



the Association of Science Editors and Publishers (ASEP)



the Digital Object Identifier Registration Agency (CrossRef)



Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License



The right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Косарев Александр Борисович, д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Заместитель главного редактора

Римская Ольга Николаевна, канд. экон. наук, доцент, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

Глюзберг Борис Эйнихович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Гогричани Георгий Венедиктович, д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 762111, <https://orcid.org/0000-0001-8586-8068>

Ерофеев Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

Захаров Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Коган Александр Яковлевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 536285, <https://orcid.org/0000-0002-0287-8015>

Куммер Себастьян, д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

Кучумов Владислав Алексеевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Мирошниченко Ольга Федоровна, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

Савин Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

Сювэй Ли, д-р наук, проф., Пекинский объединенный университет, Пекин, КНР

Ушкалов Виктор Федорович, д-р техн. наук, член-корреспондент НАН, Институт технической механики НАН, Днепр, Украина

Фёдоров Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Калининград, Российская Федерация, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

Фокс-Рабинович Герман Симонович, д-р техн. наук, Университет Макмастера, Гамильтон, Канада, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>

Шур Евгений Авелевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

Эсвельд Конрад, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Виноградов С. А., председатель, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Горячева И. Г., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

Дынькин Б. Е., д-р техн. наук, проф., почетный президент МАТУ АТР, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Колесников В. И., д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Липидус Б. М., д-р экон. наук, проф., председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Лёвин Б. А., д-р техн. наук, проф., президент РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация

Махутов Н. А., д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

Мачерет Д. А., д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Назаров О. Н., канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Розенберг Е. Н., д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

Смолянинов А. В., д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

Шенфельд К. П., д-р техн. наук, исполнительный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИЯ

Анохов Игорь Васильевич, начальник научно-издательского отдела, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru,

Сиротенко Игорь Васильевич, научный редактор, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru,

Сергеева Олеся Александровна, руководитель группы дизайна, e-mail: sergeeva.ola@vniizht.ru,

Барашков Владислав Владимирович, специалист по графическому дизайну, e-mail: barashkov.vladislav@vniizht.ru

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются. Гонорары не выплачиваются. Все статьи публикуются бесплатно.

Подписано к печати 06.09.2022. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 10,5. Тираж 300 экз. Заказ 362. Цена свободная

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Alexander B. Kosarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, First Deputy General Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Deputy Editor-in-Chief

Olga N. Rimskaya, Cand. of Sci. (Economics), Associate Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

Boris E. Glyzberg, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Georgiy V. Gogrichiani, Dr. of Sci. (Engineering), Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 762111, <https://orcid.org/0000-0001-8586-8068>

Mikhail N. Erofeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

Sergey M. Zakharov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Alexander Ya. Kogan, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Associate, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 536285, <https://orcid.org/0000-0002-0287-8015>

Sebastian Kummer, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Vienna University of Economics and Business, Vienna, Austria, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

Vladislav V. Kuchumov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Olga F. Miroshnichenko, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

Lev A. Muginshtein, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

Alexander V. Savin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice-Rector of the Russian Transport University, Moscow, Russian Federation, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

Nina F. Sirina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

Li Xuewei, Dr. of Sci., Professor, Vice-President of the Engineering Union of China Transport System, Beijing Union University, China

Victor F. Ushkalov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science in Ukraine, Institute of Technical Mechanics, Dnepr, Ukraine

Sergey V. Fedorov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

Herman S. Fox-Rabinovich, Dr. of Sci. (Engineering), Chief Researcher of McMaster Engineering University, Hamilton, Ontario, Canada, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>

Evgeniy A. Schur, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

Coenraad Esveld, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Delft Technical University, General Director of the "Esveld Consulting Services", Delft, Netherlands

EDITORIAL COUNCIL

Sergey A. Vinogradov, Chairman, Cand. of Sci. (Engineering), General Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

Irina G. Goryacheva, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the RAS, Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

Boris E. Dynkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Honored President of the IATU APC, Rostov State University of Railway Engineers, Rostov-on-Don, Moscow, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Rostov State University of Railway Engineers, Rostov-on-Don, Moscow, Russian Federation

Boris M. Lapidus, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Chairman of the Joint Scientific Council of the Russian Railways Company, Moscow, Russian Federation

Boris A. Levin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, President of the Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

Nikolay A. Makhutov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Dmitriy A. Macheret, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

Oleg N. Nazarov, Cand. of Sci. (Engineering), Deputy Head of the Technical Policy Department, Russian Railways Company, Moscow, Russian Federation

Efim N. Rosenberg, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, First Deputy General Director of the Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation, Moscow, Russian Federation

Alexander V. Smolyaninov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Wagon Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

Konstantin P. Shenfeld, Dr. of Sci. (Engineering), Executive Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL STAFF

Igor V. Anokhov, Head of the Scientific Publishing Department, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru,

Igor V. Sirotenko, Scientific Editor, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru,

Olesya A. Sergeeva, Head of the Design Group, e-mail: sergeeva.aa@vniizht.ru,

Vladislav V. Barashkov, Graphic Designer, e-mail: barashkov.vladislav@vniizht.ru

Received materials are not returned. Fees are not paid. All articles are published free of charge.

Signed to print on 06.09.2022. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 10.5 printed sheets. 300 copies. Order No. 362. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Повышение надежности тяговых электродвигателей тепловозов с учетом теплофизических параметров изоляции и проводников обмотки якоря В. И. Киселев, Т. О. Вахромеева, А. И. Федянин	213–220
Влияние аэродинамических параметров токоприемника на токосъем при скорости движения до 160 км/ч Н. В. Миронос, М. Н. Емельянова, Д. В. Тартынский	221–229
Анализ управления скольжением колесных пар грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями А. Н. Савоськин, Н. Д. Шилин	230–239
Использование теплоты отработавших газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов Г. М. Стоякин, А. В. Костин, С. Н. Науменко	240–246

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги Н. П. Григорьев, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, В. А. Ковалев, В. В. Шаталов	248–257
Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково Р. Г. Король, О. Н. Числов	258–266
Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева	267–276

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Экспериментальному кольцу АО «ВНИИЖТ» – 90 лет В. Н. Каплин, О. Н. Римская	278–285
--	---------

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Increasing reliability of traction electric motors of diesel locomotives taking into account thermophysical parameters of insulation and armature winding conductors

Valentin I. Kiselev, Tat'yana O. Vakhromeeva, Aleksey I. Fedyanin 213–220

Influence of aerodynamic parameters of current collector on current collection at movement speeds up to 160 km/h

Nikolay V. Mironos, Marina N. Emel'yanova, Denis V. Tartynskiy 221–229

Analysis of wheel pairs slip control of electric freight locomotive with asynchronous traction motors

Anatoliy N. Savos'kin, Nikita D. Shilin 230–239

Use of diesel engine exhaust gas heat for heating passenger cars

Grigoriy M. Stoyakin, Alexander V. Kostin, Sergey N. Naumenko 240–246

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Increasing the performance of the Far Eastern Railway traction power supply system

Nikolay P. Grigor'ev, Ivan V. Ignatenko, Sergey A. Vlasenko, Vladimir A. Kovalev, Vladimir V. Shatalov 248–257

Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station

Roman G. Korol', Oleg N. Chislov 258–266

System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels

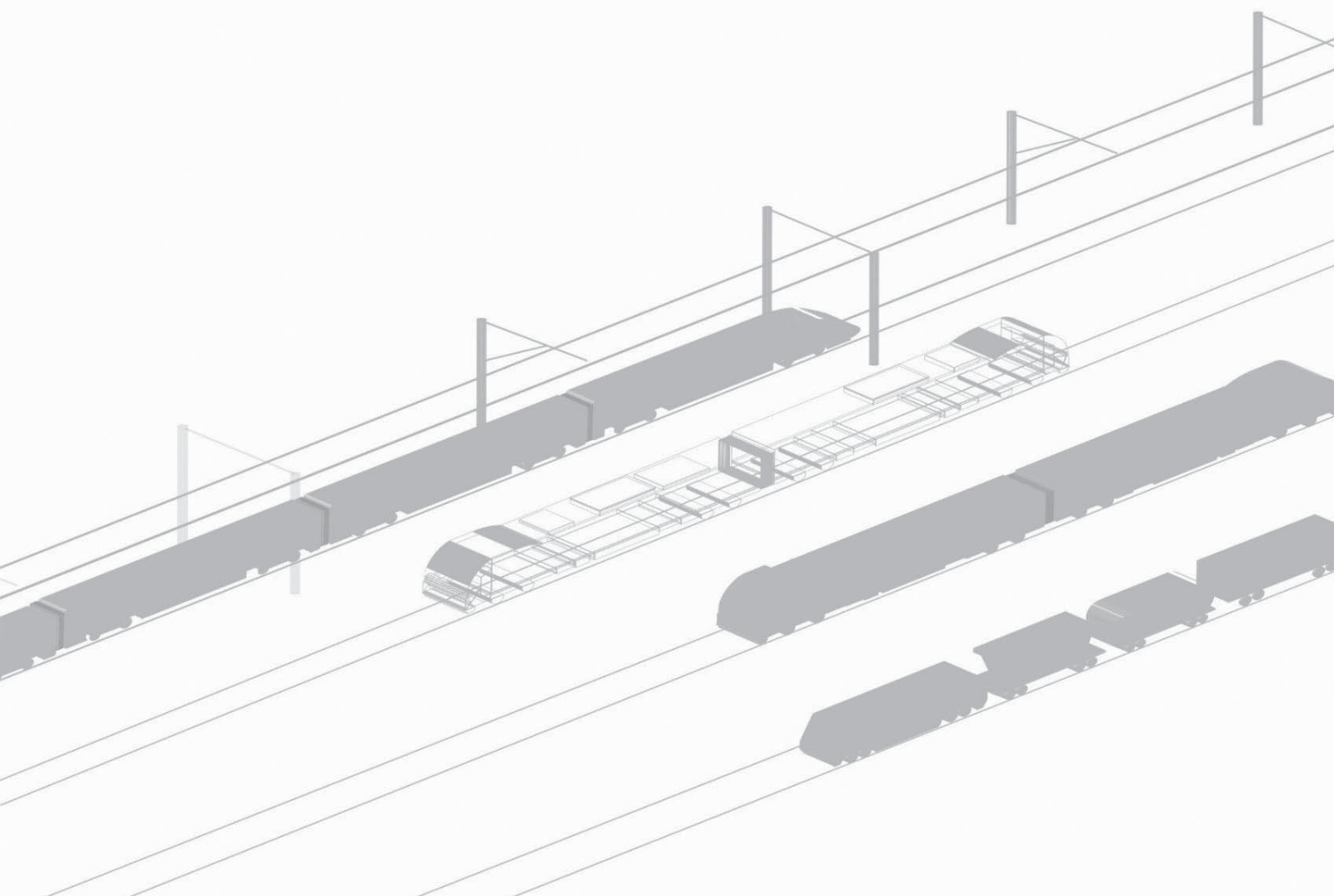
Oleg V. Moskvichev, Elena E. Moskvicheva 267–276

VNIIZHT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

The Experimental Loop of Railway Research Institute celebrates its 90th Anniversary

Valeriy N. Kaplin, Ol'ga N. Rimskaya 278–285

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА



Научная статья

УДК 621.313.04

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220

EDN: <https://elibrary.ru/chhgbo>

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЗОВ С УЧЕТОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ И ПРОВОДНИКОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В. И. Киселев✉, **Т. О. Вахромеева**, **А. И. Федянин**Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопрос обеспечения работоспособного состояния тягового электродвигателя постоянного тока является актуальным ввиду его масштабного применения на тепловозах, в том числе и современных мощных, работающих на линиях с повышенными массами поездов. В настоящее время в локомотивном хозяйстве сложилось довольно сложное положение из-за выхода из строя тяговых электродвигателей тепловозов по причинам снижения сопротивления изоляций обмоток якорей электродвигателей и последующих их пробоев: до 28% от общего числа отказов электродвигателей приходится на пробой корпусной изоляции и межвиткового замыкания якоря и 13% — на случаи понижения сопротивления изоляционного материала.

Материалы и методы. В работе рассмотрены основные направления научных изысканий по исследованию причин нарушения целостности изоляции, которые приводят к внеплановым ремонтам тяговых электродвигателей. Теоретическое обоснование первопричин разрушения изоляции основывается на значимости учета коэффициентов теплового линейного расширения меди и изолирующих ее материалов. С целью исследования термодинамических процессов в обмотке тягового электродвигателя разработана расчетная конечно-элементная модель витка обмотки, уложенного в паз сердечника якоря. Модель обмотки представлена отдельно проводником и изоляцией, между которыми заданы условия контакта. Проводнику расчетной модели от протекания тока сообщен нагрев до 120 °С. Математический аппарат, заложенный в расчетную программу MSC.Patran — Nastran, позволил оценить деформацию проводника относительно изоляции в результате линейного приращения из-за теплового расширения.

Результаты. С помощью метода математического моделирования и на основании результатов конечно-элементного анализа наглядно показано подтверждение теоретического обоснования. Различие удлинений при нагревании проводника якоря электродвигателя и изоляции, полученное методом математического моделирования, составляет 0,6 мм и является значительным для обмотки (состоящей из проводника и изоляции), которую принято рассматривать единым целым телом.

Обсуждение и заключение. Полученный результат показывает необходимость более детальных исследований для подбора технологии исполнения изоляции тягового электродвигателя постоянного тока. Применение изоляционных материалов обмотки якоря с коэффициентами теплового линейного расширения, равными коэффициенту теплового расширения меди проводников обмотки, позволит повысить надежность тяговых электродвигателей тепловозов в эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловоз, тяговый электродвигатель, отказ тягового электродвигателя, коэффициент теплового линейного расширения, изоляция, надежность

Для цитирования: Киселев В. И., Вахромеева Т. О., Федянин А. И. Повышение надежности тяговых электродвигателей тепловозов с учетом теплофизических параметров изоляции и проводников обмотки якоря // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 213–220. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220>.

Original article

UDK 621.313.04

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220

EDN: <https://elibrary.ru/chhgbo>



INCREASING RELIABILITY OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF DIESEL LOCOMOTIVES TAKING INTO ACCOUNT THERMOPHYSICAL PARAMETERS OF INSULATION AND ARMATURE WINDING CONDUCTORS

Valentin I. Kiselev✉, Tat'yana O. Vakhromeeva, Aleksey I. Fedyanin

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issue of ensuring the operable state of the DC traction motor is relevant due to its large-scale use on diesel locomotives, including modern powerful motors, operating on lines with increased train masses. At present, a rather difficult situation has developed in the locomotive industry with the failure of diesel locomotive traction electric motors due to a decrease in the insulation resistance of the armature windings of the electric motors and their subsequent breakdowns: up to 28% of the total number of failures of electric motors are due to breakdown of the hull insulation and interturn short circuit of the armature and 13% of cases are due to reduction in the resistance of the insulating material.

Materials and methods. The paper considers the main directions of scientific research on the causes of insulation integrity failure, which lead to unscheduled repairs of traction motors. The theoretical substantiation of the root causes of insulation destruction is based on the importance of taking into account the coefficients of thermal linear expansion of copper and its insulating materials. In order to study thermodynamic processes in the winding of a traction motor, a computational finite element model of a winding coil laid in the groove of the armature core has been developed. The winding model is represented separately by a conductor and insulation, between which contact conditions are specified. The conductor of the calculation model heats up to 120 °C from the current flow. Mathematical apparatus embedded in the MSC calculation program, Patran – Nastran, made it possible to evaluate the deformation of the conductor relative to the insulation as a result of a linear increment due to thermal expansion.

Results. With the help of mathematical modelling and based on the results of finite element analysis, the confirmation of the theoretical justification is clearly shown. The difference in elongation during heating of the motor armature conductor and insulation, obtained by mathematical modelling, is 0.6 mm and is significant for the winding (consisting of a conductor and insulation), which is usually considered as a single whole body.

Discussion and conclusion. The obtained result shows the need for more detailed studies to select the technology for the insulation of the DC traction motor. The use of insulating materials for the armature winding with coefficients of thermal linear expansion equal to the coefficient of thermal expansion of the copper conductors of the winding will improve the reliability of traction electric motors of diesel locomotives in operation.

KEYWORDS: diesel locomotive, traction motor, traction motor failure, coefficient of thermal linear expansion, insulation, reliability

For citation: Kiselev V. I., Vakhromeeva T. O., Fedyanin A. I. Increasing reliability of traction electric motors of diesel locomotives taking into account thermophysical parameters of insulation and armature winding conductors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):213-220. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-213-220>.

✉ kiselev40@mail.ru (V. I. Kiselev)

© Kiselev V. I., Vakhromeeva T. O.,
Fedyanin A. I., 2022

Введение. Несмотря на перспективные планы по использованию асинхронного тягового привода на мощных тепловозах, тяговые электродвигатели (ТЭД) постоянного тока пока сохраняют свои лидирующие количественные показатели. Увеличивающийся объем перевозок приводит к дополнительным нагрузкам на тяговые электрические машины, которые и без того работают в сложных эксплуатационных условиях: перепадов температуры окружающей среды, срыва сцепления, вибрации, загрязненного взвесью пыли охлаждающего воздуха.

Основным типом тягового привода грузовых тепловозов является привод I класса, или привод с опорно-осевым подвешиванием электродвигателя. При движении тепловоза на двигатель воздействуют динамические ударные нагрузки величиной до 10–20g из-за неровности пути [1, 2]. Механические возмущения в широком частотном диапазоне, а также переходные процессы в цепи электродвигателя являются источниками вибраций его узлов. В качестве преобладающих повреждений ТЭД (до 42 %) следует выделить понижение сопротивления изоляции якорных и полюсных обмоток, пробой и межвитковые замыкания обмотки якоря и полюсных обмоток [3].

Динамические возмущения могут возникать и в результате процессов, протекающих в механической части тягового привода тепловоза (например, относительные перемещения и ускорения якоря ТЭД, вызванные износом зубчатых колес редуктора и моторно-якорных подшипников).

Динамические напряжения влияют на крепление обмоток, вызывают их вибрацию, что приводит к развитию трещин и разрывов в проводниках, а также повышенному механическому износу изоляции.

Актуальным остается вопрос сохранения работоспособного состояния изоляции. Разработаны современные методы контроля и диагностирования состояния межвитковой изоляции [4], затрагиваются вопросы адекватного функционирования системы планово-предупредительных ремонтов: несоответствие норм межремонтных пробегов тепловозов и пробегов установленных на них ТЭД приводит к тому, что в ряде случаев при постановке тепловоза на текущий ремонт ТР-3 электродвигателю фактически необходимо делать капитальный ремонт, предусмотренный правилами ремонта только в условиях завода. Требуется выкатка электродвигателя из-под тепловоза и отправка его на завод, что сопряжено со значительными материальными затратами [5].

В настоящее время разрабатываются алгоритмы предиктивной диагностики для обнаружения повреждений электрических машин с целью своевременной постановки тепловоза на внеплановый ремонт для

предотвращения выхода из строя ТЭД в пути следования и предупреждения их отказов и неплановых ремонтов [6].

В [7] авторы предлагают пересмотреть систему диагностики ТЭД тепловозов и дополнить ее новым диагностическим параметром неравномерности вращения якоря.

Необходимость поиска кардинальных решений проблемы выхода из строя ТЭД по причине повреждения изоляции очевидна, и есть научные разработки, подтвержденные исследованиями, призванные предотвратить разрушение изоляции из-за несоответствия ее класса нагревостойкости действительному перегреву обмоток [8]. Такая модернизация ТЭД подразумевает повышение класса изоляции более чем на один класс по ГОСТ 2582–2013 [9] — до класса *H* вместо *F*. Предполагается также организовывать системный сбор дополнительных параметров изоляции на плановых технических обслуживаниях тепловозов с их последующей обработкой и классификацией для предиктивной диагностики изоляции ТЭД.

Принимаемые в системе эксплуатации тепловозов меры по совершенствованию качества изоляционных материалов, пропиточных лаков, разработке новых видов пропиток (ультразвуковой, вакуумной с двойным вакуумированием и т.д.) не решают проблемы в целом [10]. Затраты на устранение этих видов дефектов составляют порядка 40 % от стоимости ТЭД.

Результаты исследования. Для разрешения вопроса неплановых ремонтов ТЭД тепловозов следует подробнее рассмотреть изменение тепловых процессов в электромеханической системе якоря [11, 12].

Причина значительного числа отказов ТЭД по пробую или снижению сопротивления изоляции состоит в том, что коэффициенты теплового линейного расширения меди обмоток якоря и изолирующих ее материалов различны и отличаются в 4–5 раз (таблица, рис. 1) [13, 14]. При тепловом воздействии на детали происходит их расширение с изменением линейных размеров (рис. 2). Показателем линейной деформации от термического воздействия является коэффициент теплового линейного расширения [15].

На основании теоретических выкладок делаем вывод о том, что для надежной работы соединения токопроводящих материалов (в данном случае меди обмотки якоря) и ее изоляции коэффициенты теплового линейного расширения должны быть равны (или сопоставимы), что в действительности (в эксплуатации и теоретических исследованиях) не принимается во внимание. Таким образом, различия в значениях коэффициентов теплового линейного расширения указанных материалов неизбежно ведут к образованию трещин в изоляции, попаданию в образовавшиеся трещины продуктов износа коллектора, образованию

Таблица

Коэффициенты теплового линейного расширения
изоляционных и электротехнических материалов ТЭД

Table

Thermal linear expansion coefficients
of the insulating and conducting materials of the traction electric motors

Материал	Коэффициент теплового линейного расширения α , $^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot 10^{-6}$
ABS — стекло, армированное волокнами	30,4
Медь	16,6
Слюда	3,0
Сталь	13,0
Эпоксидная смола, литая резина и незаполненные продукты из них	55,0
Мусковит	9,0
Флогопит	8,2
Миканит	8,0
Стекломиканит	12,4
Микалента	10,5
Микафоллий	6,7
Лакоткань	10,4
Стекломикалент	6,3
Асфальто-масляный лак № 447	9,1
Лак ЭФ-5	9,1
Лак К-44	8,8
Лак МЛ-92	7,0
Компаунд ПК-11	12,3
Лента Элмикатерм 524019	6,1
Пленка Синтофлекс 515	8,0
Сталь электротехническая	12,0
Полиэфирно-эпоксидный лак ПЭ-933	7,0

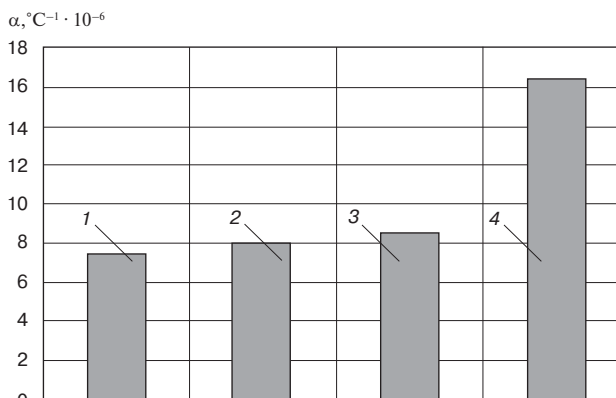


Рис. 1. Коэффициенты теплового линейного расширения меди и изолирующих ее материалов (класс нагревостойкости H):
1 — витковая изоляция (ПМ-40); 2 — корпусная изоляция (ЛИКО-ТТ); 3 — пазовая изоляция (Синтофлекс 818); 4 — медь

Fig. 1. Thermal linear expansion coefficients of copper and the insulating materials (thermal resistance class H):
1 — turn insulation (PM-40); 2 — body insulation (LIKO-TT);
3 — slot insulation (Sintoflex 818); 4 — copper

мостиков утечки тока и, наконец, пробоем изоляции, что с учетом увеличения допускаемых новыми классами изоляции превышений температуры проводников обмоток усугубляет проблему надежности ТЭД [13].

На основании этих данных определены удлинения при нагревании элементов обмотки якоря электродвигателя и изолирующих ее материалов относительно петушков коллектора, т. е. от точки сварки обмотки с коллектором.

Тем не менее результат этого явления зарегистрировать в эксплуатации не представляется возможным. В этом случае следует использовать метод математического моделирования. Использование аналитических (математических) методов исследования позволяет расширить возможности изучения рабочих процессов в ТЭД с учетом условий эксплуатации [16, 17].

На базе построенной геометрической модели (рис. 3) разработана расчетная модель (рис. 4) витка петлевой обмотки, уложенного в пазы якоря. В расчетной модели были сделаны следующие допущения: шихтованный сердечник якоря заменен на цельную модель; рассматривался сектор сердечника якоря с пазом, в который уложена половина витка обмотки; сердечник якоря на другой половине обмотки заменен граничными условиями; коллекторные пластины заменены граничными условиями.

При создании расчетной модели были использованы конечные элементы типа Tet10, число степеней свободы составило 304 708. Математический аппарат, включенный в решатель Nastran, предполагает обязательное наличие граничных условий на конечно-элементной модели, чтобы определить начальные условия, относительно которых будет вычислено линейное приращение. Граничные условия должны адекватно описывать положение обмотки на якоре ТЭД. Следует отметить, что рассматривается квазистатическое положение якоря: он находится в покое, вращательное движение отсутствует. На рис. 4 отмечены поверхности, по которым заданы граничные условия расчетной модели. Концы проводника припаяны к коллекторным пластинам (рис. 4, поз. 1), поэтому поверхностям выводов обмотки задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы. Обмотка зафиксирована банджом из специальной стеклоленты — по поверхностям сопряжения обмотки со стеклобанджом задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы (рис. 4, поз. 2). Обмотка в пазах удерживается стеклотекстолитовым клином — по поверхности сопряжения обмотки с клином задано ограничение по перемещению по трем степеням свободы (рис. 4, поз. 3). Сердечник напрессован на вал якоря: неподвижное соединение сердечника и вала также моделируется граничными условиями — ограничением по перемещению по трем степеням сво-

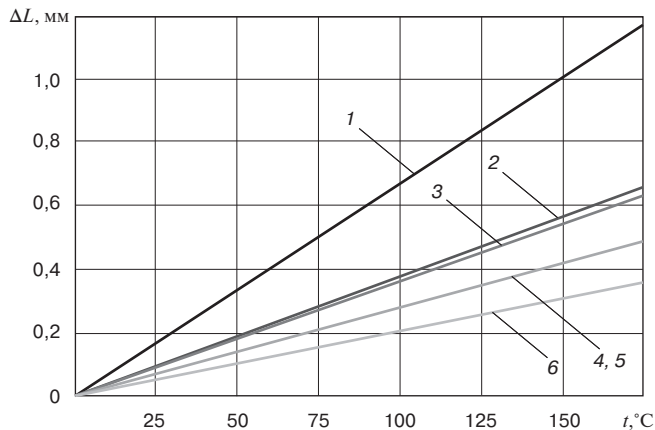


Рис. 2. Удлинение задней части обмотки якоря, сердечника и слоев изоляции в пазу якоря ТЭД относительно петушков коллектора:

1 — медный проводник; 2 — сердечник якоря;
3 — пазовая изоляция; 4, 5 — корпусная и витковая изоляция;
6 — пропиточный состав

Fig. 2. Elongation of the rear part of the armature winding, core and insulation layers in the groove of the traction electric motors armature relative to the commutator neck:

1 — copper conductor; 2 — armature core; 3 — slot insulation;
4, 5 — case and turn insulation; 6 — impregnating compound

боды (рис. 4, поз. 5). Благодаря заданию граничных условий по перемещению обмотки и сектора якоря нет необходимости моделировать отдельными телами стеклобандаж, клин, коллекторные пластины и вал якоря.

Задача решена в 2 этапа. На 1-м этапе произведен расчет нагрева проводника обмотки под действием протекающего по нему электрического тока. Расчет выполнен в модуле MD Nastran Thermal MSC Software [18]. Температура нагрева обмотки задана равной 120 °С, т. е. в пределах, установленных для изоляции класса нагревостойкости F [9]. Результаты 1-го этапа были использованы в качестве входных данных для 2-го.

На 2-м этапе достигнута цель исследования: определена деформация обмотки и изоляции из-за расширения под воздействием тепла от протекающего по обмотке электрического тока. Расчет на 2-м этапе выполнен в модуле MD Nastran Structural MSC Software.

Результат исследования показал, что значительным удлинением из-за теплового расширения медного проводника подвергается лобовая часть обмотки (рис. 5).

Изоляция подвергается тепловому расширению под действием нагрева от протекания тока по проводникам, в том числе и в лобовых частях, где обмотка испытывает наибольшие деформации (рис. 6).

При прохождении через якорную обмотку электрического тока медные проводники обмотки удлиняются в большей степени, чем изоляционный

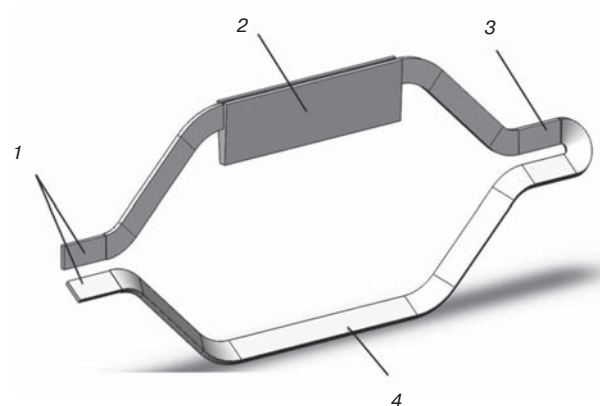


Рис. 3. Геометрическая модель витка обмотки, уложенного в пазы якоря:

1 — выводы обмотки для присоединения к коллекторным пластинам; 2 — сектор сердечника якоря; 3 — лобовая часть обмотки; 4 — виток обмотки с изоляцией

Fig. 3. Geometric model of a winding loop laid in the armature grooves:
1 — winding leads for connection to commutator plates; 2 — armature core sector; 3 — frontal part of the winding; 4 — winding loop with insulation

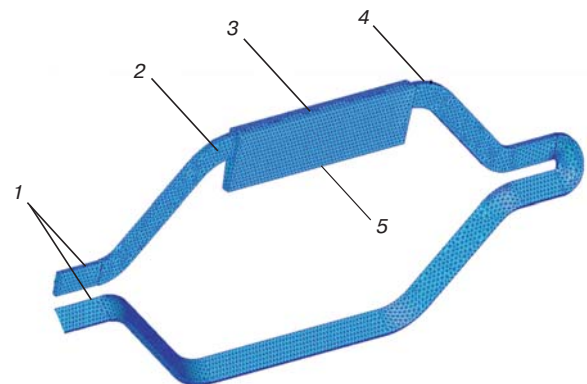


Рис. 4. Расчетная модель с указанными граничными условиями:
1 — припайка выводов обмотки к коллекторным пластинам;
2, 4 — стеклобандаж; 3 — клин; 5 — напрессовка сердечника якоря на вал ТЭД

Fig. 4. Calculation model with the indicated boundary conditions:
1 — soldering the winding leads to the commutator plates;
2, 4 — glass binding; 3 — wedge; 5 — pressing sleeve of the armature core onto the traction electric motors shaft

материал (рис. 6). Защитная изоляция не может деформироваться на величину, достаточную для компенсации теплового расширения медной обмотки. Как следствие, изолирующий материал растрескивается при деформации. В трещины проникает влажный воздух и конденсат, продукты износа коллекторно-щеточного узла. Так появляются каналы утечки тока от обмотки через изоляцию, что создает предпосылки для пробоя изоляции якоря, приводящего к выходу ТЭД из строя.

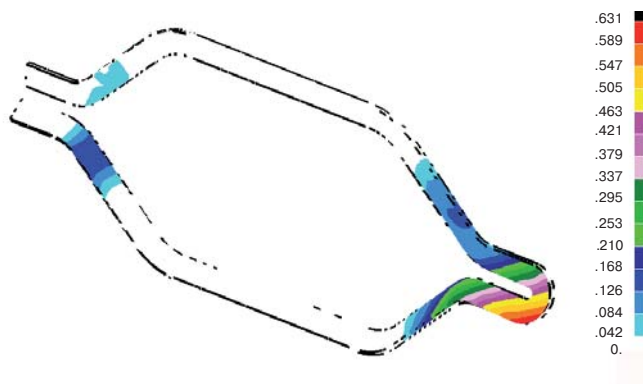


Рис. 5. Деформации медной обмотки (указаны в миллиметрах)

Fig. 5. Deformation of the copper winding (indicated in millimetres)

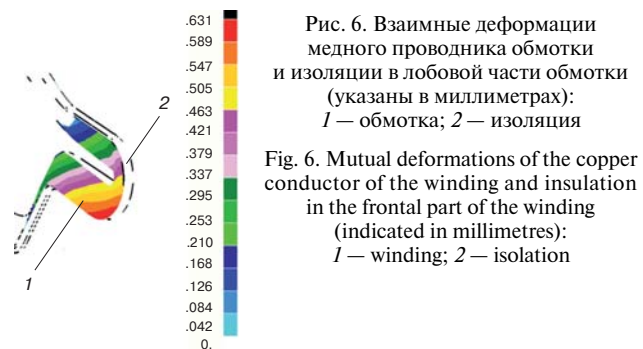


Рис. 6. Взаимные деформации медного проводника обмотки и изоляции в лобовой части обмотки (указаны в миллиметрах): 1 — обмотка; 2 — изоляция

Fig. 6. Mutual deformations of the copper conductor of the winding and insulation in the frontal part of the winding (indicated in millimetres): 1 — winding; 2 — isolation

Заключение. Несоответствие в 4–5 раз коэффициентов теплового линейного расширения меди обмоток якорей и изолирующих ее материалов является одним из основных факторов низкой надежности работы изоляции обмоток якорей ТЭД и служит причиной отказа ТЭД в эксплуатации ранее сроков, заявляемых заводами-изготовителями.

Для устранения выходов из строя ТЭД по причине пробоя изоляции и понижения ее сопротивления необходимо применение изоляционных материалов с коэффициентом теплового линейного расширения, равным коэффициенту теплового линейного расширения меди.

С целью реализации предложений необходимо проведение широких фундаментальных исследований по созданию изоляционных материалов с коэффициентом теплового линейного расширения, равным по значению коэффициенту расширения изолируемых токопроводящих элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Influence of Process Parameters on Dynamics of Traction Motor Armature / S. Shantarenko [et al.] // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. P. 961–971.

2. Механическая часть тягового привода: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Бирюков [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 440 с.

3. Федянин А. И. Актуальные проблемы надежности тяговых электродвигателей локомотивов в эксплуатации // *Локомотивы. Электрический транспорт — XXI век: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г.)* / Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. СПб.: ПГУПС, 2020. С. 19.

4. Шкодун П. К., Галеев А. Д. Анализ современных методов диагностирования повреждений изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XI науч. конф., посвящ. Дню российской науки* / Омский государственный университет путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2017. С. 96–101.

5. Санников А. С., Чубарев В. Е., Колмаков В. О. Статистика и виды отказов тяговых электродвигателей электровозов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. Issue 17. P. 74–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-74-76>.

6. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 СИНАРА // *Транспорт Урала*. 2021. Т. 71, № 4. С. 74–79.

7. Диагностирование тяговых электродвигателей по неравномерности вращения якоря / Б. Е. Боднар [и др.] // *Наука та прогрес транспорту*. 2013. Т. 45, № 3. С. 13–21.

8. Похор Д. И. Результаты эксплуатационных испытаний опытной системы изоляции класса «Н» тяговых двигателей тепловозов и ее контроль средствами мобильной диагностики // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2021. № 4. С. 35–46.

9. ГОСТ 2582–2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1969-ст: дата введения 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 66 с.

10. Данковцев В. Т., Киселев В. И., Четвергов В. А. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов. М.: Маршрут, 2007. 326 с.

11. Грищенко М. А. Анализ теплового состояния обмотки якоря тягового электродвигателя // *Транспорт Урала*. 2009. Т. 20, № 1. С. 73–76.

12. Грищенко М. А. Математическое моделирование процесса теплопередачи в ядре тягового электродвигателя тепловоза // *Известия Петербургского университета путей сообщения (Известия ПГУПС)*. 2010. Т. 22, № 1. С. 33–44.

13. Киселев В. И., Файзибаев Ш. С., Федянин А. И. Надежность тяговых электродвигателей локомотивов // *Железнодорожный транспорт*. 2020. № 10. С. 48–49.

14. Киселев В. И. Повышение надежности тяговых электродвигателей локомотивов // *Железнодорожный транспорт*. 2017. № 6. С. 66–67.

15. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. 294 с.

16. Henaon H., Kia S. H., Capolino G.-A. Torsional-Vibration Assessment and Gear-Fault Diagnosis in Railway Traction System // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, no. 5. P. 1707–1717.

17. Грищенко М. А. Повышение остаточного ресурса якорей тяговых электродвигателей за счет ограничения максимальной температуры обмоток: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб., 2010. 156 с.

18. MSC. Nastran 2004. Reference Manual / MSC Software Corporation. [S. l.], 2004. 990 p.

REFERENCES

1. Shantarenko S., Kuznetsova V., Ponomareva E., et al. Influence of Process Parameters on Dynamics of Traction Motor Armature. *Transportation Research Procedia*. 2021;(54):961-971.

2. Biryukov I. V., Savos'kin A. N., Burchak G. P., et al. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo privoda [The mechanical part of the traction drive]. Moscow: Transport Publ.; 1992. 440 p. (In Russ.).
3. Fedyanin A. I. Aktual'nye problemy nadezhnosti tyagovykh elektrodvigately lokomotivov v ekspluatatsii [Actual problems of reliability of traction electric motors of locomotives in operation]. Lokomotivy. Elektricheskii transport – XXI vek [Locomotives. Electric transport – XXI century]. Procs. of the VII Intern. sci.-tech. conf. (St. Petersburg, November 10–12, 2020). St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2020. P. 19. (In Russ.).
4. Shkodun P. K., Galeev A. D. Analiz sovremennykh metodov diagnostirovaniya povrezhdeniy izolyatsii tyagovykh elektrodvigately podvizhnogo sostava [Analysis of modern methods for diagnosing damage to the insulation of rolling stock traction electric motors]. Innovatsionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovation projects and technologies in education, industry and transport]. Procs. of the XI scientific. conf., dedicated to the Day of Russian Science. Omsk: OmGUPS Publ.; 2017. P. 96–101. (In Russ.).
5. Sannikov A. S., Chubarev V. E., Kolmakov V. O. Statistika i vidy otkazov tyagovykh elektrodvigately elektrovozov [Statistics and types of failures of electric locomotive traction motors]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019;(17):74–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-17-74-76>. (In Russ.).
6. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Razrabotka algoritma diagnostiki tyagovykh elektrodvigately elektrovozov 2ES6 SINARA [Development of an algorithm for diagnosing traction electric motors of electric locomotives 2ES6 SINARA]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2021;71(4):74–79. (In Russ.).
7. Bodnar' B. E., Ochkasov A. B., Chernyayev D. V., Shevchenko Ya. I. Diagnostirovanie tyagovykh elektrodvigately po neravnomernosti vrashcheniya yakorya [Diagnosis of traction electric motor at irregularity in speed of anchor rotation]. *Nauka ta progres transportu = Science and Transport Progress*. 2013;45(3):13–21. (In Russ.).
8. Pokhor D. I. Rezul'taty ekspluatatsionnykh ispytaniy opytной sistemy izolyatsii klassa "H" tyagovykh dvigateley teplovozov i ee kontrol' sredstvami mobil'noy diagnostiki [Results of operational tests of an experimental insulation system of class "H" of traction engines of diesel locomotives and its control by means of mobile diagnostics]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of scientific research results*. 2021;(4):35–46. (In Russ.).
9. GOST 2582–2013. Mashiny elektricheskies vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Int. standard. Introduced as Russian nat. standard on November 22, 2013 No. 1969-st: introduction date 2015-01-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 66 p. (In Russ.).
10. Dankovtsev V. T., Kiselev V. I., Chetvergova V. A. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont lokomotivov [Maintenance and repair of locomotives]. Moscow: Marshrut Publ.; 2007. 326 p. (In Russ.).
11. Grishchenko M. A. Analiz teplovogo sostoyaniya obmotki yakorya tyagovogo elektrodvigatelya [Analysis of the thermal state of the armature winding of a traction motor]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2009;20(1):73–76. (In Russ.).
12. Grishchenko M. A. Matematicheskoe modelirovanie protsessov teploperedachi v yakore tyagovogo elektrodvigatelya teplovoza [Mathematical modeling of the heat transfer process in the armature of a locomotive traction electric motor]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta puty soobshcheniya (Izvestiya PGUPS) = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2010;22(1):33–44. (In Russ.).
13. Kiselev V. I., Fayzibaev Sh. S., Fedyanin A. I. Nadezhnost' tyagovykh elektrodvigately lokomotivov [Reliability of locomotive traction electric motors]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2020;(10):48–49. (In Russ.).
14. Kiselev V. I. Povyshenie nadezhnosti tyagovykh elektrodvigately lokomotivov [Improving the reliability of locomotive traction electric motors]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2017;(6):66–67. (In Russ.).
15. Novikova S. I. Teplovoe rasshirenie tverdykh tel [Thermal expansion of solids]. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 294 p. (In Russ.).
16. Henaio H., Kia S. H., Capolino G.-A. Torsional-Vibration Assessment and Gear-Fault Diagnosis in Railway Traction System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(5):1707–1717.
17. Grishchenko M. A. Povyshenie ostatochnogo resursa yakorey tyagovykh elektrodvigately za schet ogranicheniya maksimal'noy temperatury obmotok [Increasing the residual life of traction motor armatures by limiting the maximum temperature of the windings]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis: 05.22.07. St. Petersburg; 2010. 156 p. (In Russ.).
18. MSC. Nastran 2004. Reference Manual. MSC Software Corporation. [S. l.]; 2004. 990 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валентин Иванович КИСЕЛЕВ,

профессор, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 707815, <https://orcid.org/0000-0001-7601-4351>

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА,

доцент, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,
vakhromeeva.tatiana@yandex.ru, Author ID: 795098,
<https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

Алексей Игоревич ФЕДЯНИН,

аспирант, кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,
lekha.fedyanin@yandex.ru, Author ID: 1158832,
<https://orcid.org/0000-0002-2161-6782>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin I. KISELEV,

Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.),
Author ID: 707815, <https://orcid.org/0000-0001-7601-4351>

Tat'yana O. VAKHROMEVA,

Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St., vakhromeeva.tatiana@yandex.ru),
Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

Aleksey I. FEDYANIN,

Postgraduate, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St., lekha.fedyanin@yandex.ru), Author ID: 1158832,
<https://orcid.org/0000-0002-2161-6782>

ВКЛАД АВТОРОВ

Валентин Иванович КИСЕЛЕВ. Формирование направления исследования, его актуальности, целесообразности. Фундаментальное исследование свойств изоляционных материалов электрических машин. Теоретическое формулирование первоначальных причин разрушения изоляции, заключающейся в несоответствии коэффициентов теплового расширения медного проводника и изолирующих материалов обмотки якоря (70%).

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА. Анализ научных работ, посвященных решению вопроса повышения надежности работы тяговых электродвигателей в эксплуатации. Разработка геометрической и расчетной моделей обмотки якоря, уложенной в паз сердечника якоря. Выполнение термодинамического расчета методом конечных элементов. Анализ результатов расчета (20%).

Алексей Игоревич ФЕДЯНИН. Анализ неисправностей тяговых электродвигателей постоянного тока. Анализ научных работ, посвященных вопросам термодинамических процессов, протекающих в электрических машинах (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valentin I. KISELEV. Choosing the research direction, substantiating its relevance, expediency. Fundamental study of the properties of insulating materials of electrical machines. Theoretical formulation of the root cause of the destruction of the insulation, which consists in the discrepancy between the coefficients of thermal expansion of the copper conductor and the insulating materials of the armature winding (70%).

Tat'yana O. VAKHROMEYEVA. Analysis of scientific papers devoted to solving the issue of improving the reliability of traction motors in operation. Development of geometric and calculation

models of the armature winding, laid in the groove of the armature core. Performing a thermodynamic calculation by the finite element method. Analysis of calculation results (20%).

Aleksey I. FEDYANIN. Analysis of failures in DC traction motors. Analysis of scientific papers devoted to the issues of thermodynamic processes occurring in electrical machines (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.04.2022, первая рецензия получена 23.04.2022, вторая рецензия получена 18.05.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 20.04.2022, first review received 23.04.2022, second review received 18.05.2022, accepted for publication 29.08.2022.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

РАСЧЕТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОБЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КУЗОВА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА «ОЛИМП»

М. И. Мехедов, А. В. Кузнецов,
А. А. Крылов, С. Н. Наumenко

РПК «ОЛИМП» представляет собой программное обеспечение, применение которого дает возможность автоматизировать расчет величины общего коэффициента теплопередачи K по минимальному количеству экспериментальных данных, полученных за первые 11 часов проведения теплотехнических испытаний в соответствии с методикой, утвержденной в Соглашении о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок.



Знание величины K позволяет грузоотправителю осуществить обоснованный выбор изотермического транспортного средства (ИТС) и отдать предпочтение той технологии перевозки скоропортящегося груза, которая обеспечит сохранность его качества при доставке.

РПК «ОЛИМП» предназначен для испытательных центров, аккредитованных на проведение теплотехнических испытаний специальных транспортных средств. Программное обеспечение содержит нормативную и методическую базу по проведению теплотехнических испытаний и автоматически создает стандартные формы выходных протоколов.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ
№ 2022617514 от 21.04.2022

Более подробная информация на сайте:
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48492411>

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».
Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

Научная статья

УДК 621.336.3

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-221-229

EDN: <https://elibrary.ru/czmqjs>



ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОКОПРИЕМНИКА НА ТОКОСЪЕМ ПРИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ДО 160 КМ/Ч

Н. В. Миронос¹✉, М. Н. Емельянова¹, Д. В. Тартынский²

¹Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

²Софрино Электротранспорт (С Электротранспорт),
Московская область, пос. Софрино, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье исследовано влияние аэродинамических параметров токоприемника на контактное нажатие. С этой целью определено их влияние в диапазоне скорости движения до 160 км/ч на качество токосъема, в частности на повышенный износ вставок токоприемника.

Материалы и методы. Была разработана методика расчета аэродинамических сил с применением математического моделирования методом вычислительной гидродинамики. Токоприемник можно условно разделить на три части: основание, механизм подъема и полз. Основной характеристикой этого взаимодействия является значение силы, с которой полз прижимается к контактному проводу, и стабильность обеспечения этой силы в динамически меняющихся внешних условиях.

Результаты. Проведенное моделирование показало, что при скорости около 140 км/ч возникают колебания полза, изменяющие контактное нажатие. Это позволило объяснить причину повышенного износа вставок при испытаниях и запуске в эксплуатацию электропоездов типа ЭС2Г и ЭТ4А, на которых используются однотипные токоприемники. Наличие вблизи полза токоприемника его держателя, представляющего собой трубу, расположенную вдоль всей длины полза на незначительном удалении, принципиально меняет картину обтекания. На основании проведенного математического моделирования были внесены изменения в конструкцию полза токоприемника с целью улучшения его аэродинамических свойств. Были использованы другие токосъемные элементы, позволяющие обеспечить стабильные аэродинамические свойства полза в заданном диапазоне скоростей.

Обсуждение и заключение. Внесенные изменения в конструкцию полза позволили решить проблему с повышенным износом вставок токоприемника при скорости движения до 160 км/ч. Проведенные исследования и внесенные на их основе изменения в ГОСТ 32204—2013 позволяют повысить надежность и долговечность работы устройств токосъема.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: токоприемник электроподвижного состава, аэродинамические силы токоприемника, аэродинамические характеристики

Благодарности: в память о коллеге Павле Георгиевиче Тюрнине (1959–2020) авторы выражают благодарность за идею и подготовленные материалы.

Для цитирования: Миронос Н. В., Емельянова М. Н., Тартынский Д. В. Влияние аэродинамических параметров токоприемника на токосъем при скорости движения до 160 км/ч // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 221–229. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-221-229>.

✉ mironos.nikolai@vniizht.ru (Н. В. Миронос)

© Миронос Н. В., Емельянова М. Н.,
Тартынский Д. В., 2022

Original article

UDK 621.336.3

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-221-229

EDN: <https://elibrary.ru/czmqjs>



INFLUENCE OF AERODYNAMIC PARAMETERS OF CURRENT COLLECTOR ON CURRENT COLLECTION AT MOVEMENT SPEEDS UP TO 160 KM/H

Nikolay V. Mironos¹✉, Marina N. Emel'yanova¹, Denis V. Tartynskiy²

¹Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

²Sofrino Electric Transport (S Electric Transport),
Moscow region, Sofrino, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article investigates the influence of the aerodynamic parameters of the current collector on the contact force. For this purpose, the influence in the speed range up to 160 km/h on the quality of the current collection, in particular on the increased wear of the current collector contact strips, was determined.

Materials and methods. A method for calculating aerodynamic forces was developed using mathematical modelling by the method of computational fluid dynamics. The current collector can be conditionally divided into three parts: the base, the current collector lifting mechanism and the current collector head. The main characteristic of this interaction is the force with which the head is pressed against the contact wire and the stability of this force in dynamically changing external conditions.

Results. The simulation performed showed that at a speed of about 140 km/h, head vibrations occur that change the contact force. This made it possible to explain the increased wear of the inserts during testing and commissioning of electric trains of the ES2G and ET4A types, which use the same type of current collectors. The presence of the current collector holder near its head, which is a pipe located along the entire length of the head at a slight distance, fundamentally changes the flow pattern. Based on the performed mathematical modelling, changes were made to the design of the current collector head in order to improve its aerodynamic properties. Other current-collecting elements were used to ensure stable aerodynamic properties of the head in a given speed range.

Discussion and conclusion. The introduced changes made it possible to solve the problem with increased wear of the contact strips at a speed of up to 160 km/h. The conducted studies and the introduction of changes in GOST 32204–2013 based on these studies will improve the reliability and durability of the current collection devices.

KEYWORDS: bow current collector of electric rolling-stock, current collector aerodynamic forces, aerodynamic characteristics

Acknowledgments: in memory of our colleague Pavel G. Tyurnin (1959–2020), the authors express their gratitude for the idea and prepared materials.

For citation: Mironos N. V., Emel'yanova M. N., Tartynskiy D. V. Influence of aerodynamic parameters of current collector on current collection at movement speeds up to 160 km/h. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):221-229. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-221-229>.

Введение. Токосъемник — один из элементов системы токосъема, обеспечивающий передачу электроэнергии от контактного провода на подвижной состав. От параметров токосъемника зависит надежность и долговечность работы всех элементов системы токосъема. Для скоростного и высокоскоростного движения определяющими становятся аэродинамические параметры токосъемника.

В соответствии с требованиями ГОСТ 32204–2013 [1] измерения аэродинамических показателей токосъемника (в части определения вертикальной составляющей аэродинамической силы) проводятся при скорости более 160 км/ч. Считалось, что аэродинамика не сильно влияет на взаимодействие токосъемника с контактной подвеской при скоростях ниже 160 км/ч.

Однако проведенные испытания электропоезда ЭТ4А по условиям токосъема показали, что уже в диапазоне от 60 до 120 км/ч среднее контактное нажатие изменялось в широких пределах до 70 %. На рис. 1 приведены результаты измерений контактного нажатия, полученные при испытании электропоезда ЭТ4А. Испытания проводились для трех вариантов конструкции токосъемника: без аэродинамических экранов (АЭ) и при двух положениях АЭ под углом 22 и 11° к горизонту. Графики приведены для двух направлений движения электропоезда — соответственно у токосъемника это «коленом» вперед и «коленом» назад. Как видно из рисунка, контактное нажатие значительно изменяется с ростом скорости. Это означает, что на процесс токосъема уже на скорости движения от 60 км/ч заметно влияет вертикальная составляющая аэродинамической силы токосъемника. Такое значительное изменение может приводить к повышенному износу контактного провода и вставок токосъемника и в целом ухудшает токосъем.

В соответствии с п. 5.1.7 ГОСТ 32204–2013 для легкого токосъемника контактное нажатие в рабочем диапазоне, включая аэродинамическую силу, должно быть не менее 70 Н. Это означает, что аэродинамические характеристики токосъемника уже при скорости движения более 60 км/ч заметно влияют на качество токосъема.

Аэродинамические свойства токосъемника заметно влияют на контактное нажатие и, как следствие, это может приводить к повышенному механическому износу токосъемных элементов (вставок) токосъемников электропоезда [2], а это, в свою очередь, приводит к их износу и снижению срока эксплуатации. Например, в начальном периоде эксплуатации возникла проблема повышенного износа вставок токосъемников электропоезда ЭС2Г на участке Москва — Тверь. Пробег на линии по факту не превышал 5 тыс. км при скоростях движения до 160 км/ч. Нормативный показатель пробега токосъемных вставок — не менее 40 тыс. км.

Цель исследования и актуальность. Цель исследования — обоснование выбора аэродинамических свойств токосъемников и внесение соответствующих изменений в ГОСТ 32204–2013.

Для изучения вопроса были проанализированы различные работы по изучению влияния аэродинамических параметров токосъемника на токосъем.

В работах [3, 4] рассматривается теоретический метод расчета поведения токосъемника под воздействием аэродинамических сил различного происхождения, в том числе поля скоростей воздушных потоков в рабочей зоне токосъемника. Теоретические вопросы моделирования воздушного потока изучены в работе [5]. Совершенствование методов измерения аэродинамических параметров с учетом применения различных установок можно найти в исследованиях [6–10]. Много работ посвящено влиянию конструкции токосъемника и его отдельных элементов на аэродинамические характеристики [11, 12, 13], а также влиянию аэродинамического воздействия на токосъемник в зависимости от места его расположения и числа токосъемников на крыше электроподвижного состава [14, 15].

При этом в работах [16, 17, 18] детально изучена задача стабилизации контактного нажатия токосъемника посредством изменения аэродинамической составляющей за счет применения аэродинамического компенсирующего устройства.

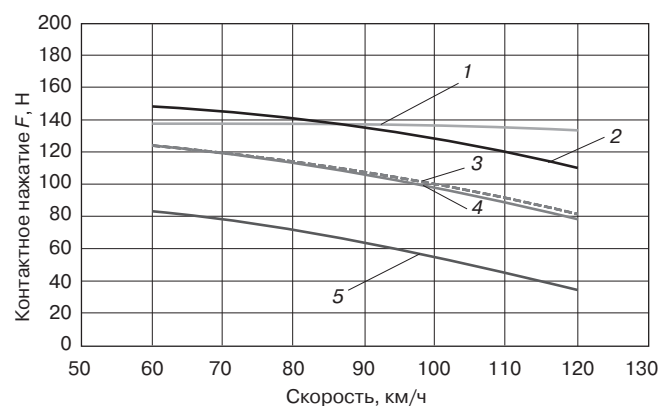


Рис. 1. Экспериментальные данные зависимости среднего контактного нажатия от скорости движения для трех вариантов конструкции токосъемника:

1 — АЭ 22°, «коленом» вперед; 2 — АЭ 22°, «коленом» назад;
3 — АЭ 11°, «коленом» вперед; 4 — АЭ 11°, «коленом» назад;
5 — без АЭ, «коленом» вперед

Fig. 1. Experimental data on the dependence of the average contact pressure on the movement speed for three variants of the current collector design:

1 — aerodynamic screen 22°, knee forward;
2 — aerodynamic screen 22°, knee backward;
3 — aerodynamic screen 11°, knee forward;
4 — aerodynamic screen 11°, knee backward;
5 — without aerodynamic screen, knee forward

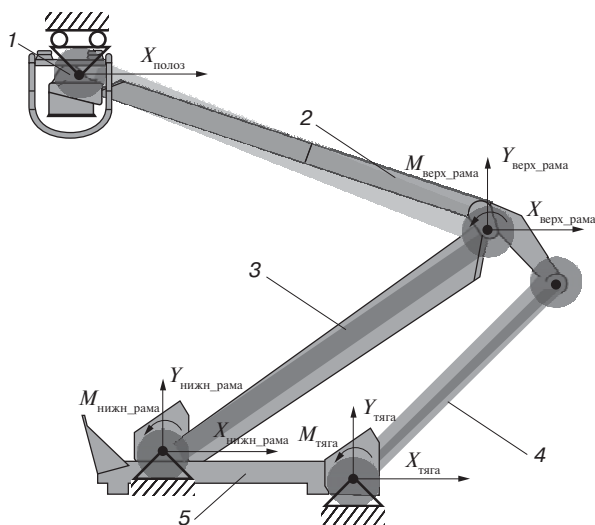


Рис. 2. Кинематическая схема механизма токоприемника и действующие на элементы механизма внешние силы и моменты: 1 — полз; 2 — верхняя рама; 3 — нижняя рама; 4 — нижняя тяга; 5 — основание

Fig. 2. Kinematic diagram of the current collector mechanism and external forces and moments acting on the elements of the mechanism: 1 — head; 2 — upper arm; 3 — lower arm; 4 — lower thrust; 5 — base

Исследование аэродинамических свойств каждой части токоприемника приведено в работе [17].

В существующих нормативах, в частности для проектирования электропоездов, требования по аэродинамической составляющей контактного нажатия обычно приводятся для скорости движения более 160 км/ч.

Таким образом, анализ рассмотренных работ показал, что остались нерешенные вопросы с определением влияния аэродинамики на качество токосъема при скорости движения до 160 км/ч.

Постановка задачи и шаги по ее решению. Чтобы решить поставленную задачу, были выполнены следующие шаги:

- проведено математическое моделирование аэродинамических параметров элементов токоприемника типа ЛА 19 с использованием метода вычислительной гидродинамики с целью выявления их влияния на качество токосъема;
- внесены изменения в конструкцию токоприемника;
- определено влияние на износ токосъемных элементов изменений, внесенных в конструкцию токоприемника.

Моделирование аэродинамических сил токоприемника методом вычислительной гидродинамики. Токоприемник целесообразно разделить на три условные части: основание, механизм подъема и полз. Конструкция токоприемника должна обеспечивать стабильный контакт между ползком токоприемника

и контактным проводом в различных условиях эксплуатации. Основной характеристикой этого взаимодействия является значение силы, с которой полз прижимается к контактному проводу, и стабильность обеспечения этой силы в динамически меняющихся внешних условиях.

Заданное нажатие на контактный провод обеспечивается за счет подъемного механизма. На рис. 2 приведена кинематическая схема токоприемника, а на рис. 3 — поэлементная схема токоприемника, построенная средствами MatLab Sim-Scape/SimMechanics.

Для решения задачи по определению влияния сил и моментов на отдельные элементы в этой схеме присутствуют три подвижных тела, закрепленных шарнирно на неподвижном основании: нижняя рама, верхняя рама в сборе с ползком и нижняя тяга. Верхний свободный конец верхней рамы закреплен посредством призматического шарнира с одной степенью свободы вдоль оси x на высоте, соответствующей высоте раскрытия токоприемника, механизм — двумерный.

При решении задачи ко всем трем элементам прикладывались соответствующие аэродинамические силы и моменты (силы X , Y и момент M_z), также к свободному концу верхней рамы прикладывалась сила X , соответствующая продольной силе на сборке ползка (вертикальная сила Y на ползке компенсирована реакцией контактного провода). Из расчета определялась вертикальная сила реакции на свободном конце верхней рамы (горизонтальная соответственно была равна 0).

Конструкция токоприемника представляет собой фактически две последовательно соединенных подвесных системы: механизм подъема токоприемника и подвеску ползка. В общем случае силы, действующие в контакте ползков токоприемника — контактный провод, можно описать по формуле

$$F_{\text{под}} + F_{\text{аэрод.тп}} + F_{\text{аэрод.полз}} + F_{\text{вес}} + F_{\text{дин}} + F_{\text{реак}} = 0,$$

где $F_{\text{под}}$ — сумма сил, действующих на полз со стороны пружинных, пневматических элементов подъемного механизма, Н; $F_{\text{аэрод.тп}}$ — сила, действующая на полз со стороны механизма токоприемника, обусловленная действием аэродинамических сил на элементы токоприемника с учетом кинематических связей между этими элементами, Н; $F_{\text{аэрод.полз}}$ — аэродинамическая сила, действующая на полз, Н; $F_{\text{вес}}$ — сумма сил веса элементов токоприемника с учетом кинематических связей между этими элементами, Н; $F_{\text{дин}}$ — силы, появляющиеся при перемещении токоприемника, включая силу трения, инерционную и др., Н; $F_{\text{реак}}$ — сила реакции контактной подвески (в нашем случае отражает силу контактного нажатия), Н.

Целью выбора конструкции токоприемника стало определение аэродинамической силы, действующей на полз, аэродинамической силы, действующей от

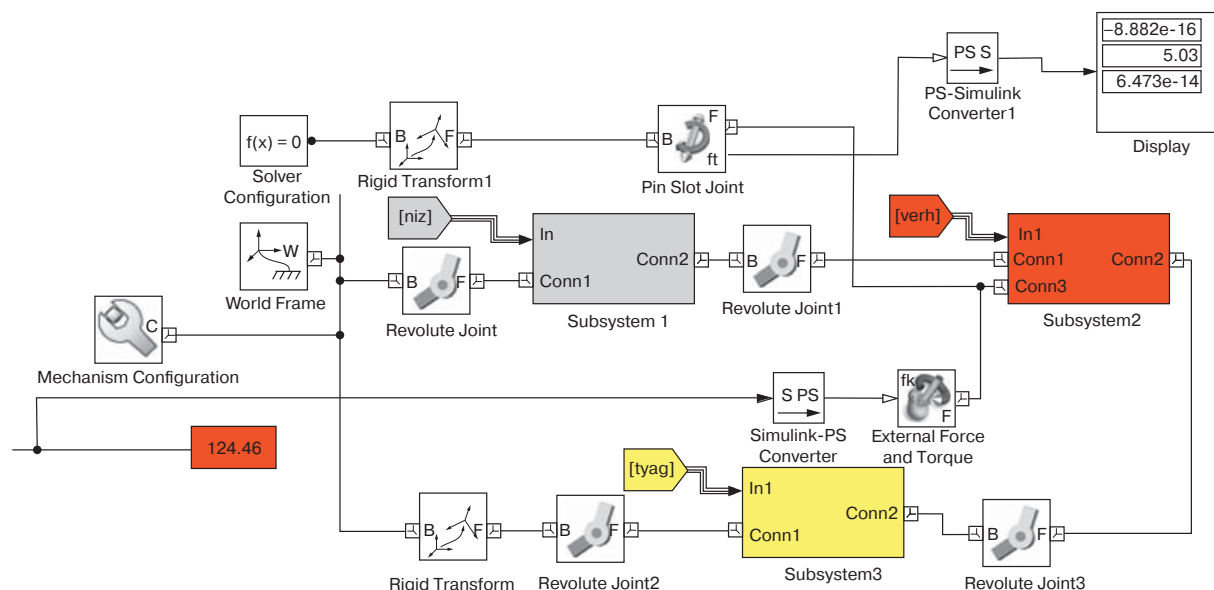


Рис. 3. Поэлементная схема кинематической модели токоприемника в среде Sim-Scape/SimMechanics

Fig. 3. Element-by-element diagram of the kinematic model of the current collector in the Sim-Scape/SimMechanics environment

рамы токоприемника, и силы подъемного механизма токоприемника, направленной вверх, для обеспечения заданного контактного нажатия.

Для вычисления аэродинамических сил и моментов, действующих на столь сложную, плохообтекаемую конструкцию, применяется современный метод вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics).

В данном исследовании для расчетов уравнений интегральных аэродинамических нагрузок использовался пакет STAR-CCM+ v10 с учетом следующих условий:

1) Исходя из требования обеспечения «идеальной» силы нажатия полоза к контактному проводу, равной 90 Н вне зависимости от скорости движения электроподвижного состава, расчетная точка — 40 м/с (144 км/ч). Именно при такой скорости обеспечивается $F_{\text{аэрод. полоз}} = 100 \text{ Н}$ и $F_{\text{аэрод. тп}} = -90 \text{ Н}$.

2) Обтекание потоком воздуха конструкции токоприемника должно быть смоделировано при скорости движения в диапазоне от 20 до 40 м/с.

3) Заданные характеристики выбранной конструкции токоприемника (ЛА 19) должны быть обеспечены вне зависимости от направления движения электроподвижного состава.

Каждый элемент токоприемника обладает индивидуальными аэродинамическими свойствами. В результате получим, что контактное нажатие — это суммарное значение аэродинамических и динамических сил, действующих на каждый элемент токоприемника, включая значения силы от подъемного механизма.

Полоз токоприемника ЛА 19 электропоезда ЭТ4А представляет собой замкнутую конструкцию из двух рядов вставок длиной 1200 мм, соединенных между собой изогнутыми трубами диаметром 12 мм. Общая длина конструкции составляет 2100 мм. Сборка каркаса полоза является плохообтекаемым телом. В составе сборки имеются тела прямоугольного, круглого сечения, пластины, расположенные поперек потока. При обтекании потоком воздуха таких тел говорят о нефиксированной точке схода, или отрыва потока. На рассматриваемых скоростях (20–40 м/с) обтекание подобных конструкций носит нестационарный характер. На рис. 4 приведена упрощенная сборка изолированного полоза (лишена внутренних полостей, несущественных для аэродинамики элементов, таких как крепежные элементы, облегчающие отверстия и пр.).



Рис. 4. Внешний вид изолированного полоза токоприемника упрощенной сборки для моделирования

Fig. 4. Appearance of the insulated current collector head of the simplified assembly for modelling

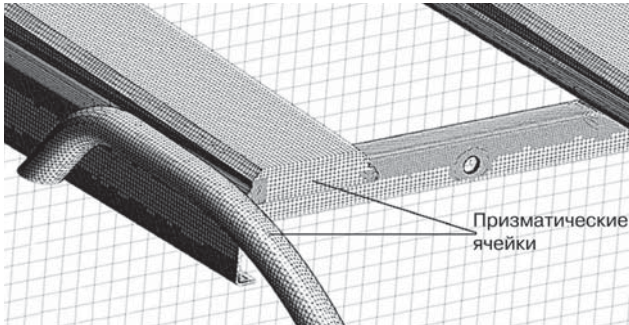


Рис. 5. Сеточное разрешение поверхности полоза

Fig. 5. Grid resolution of the head surface

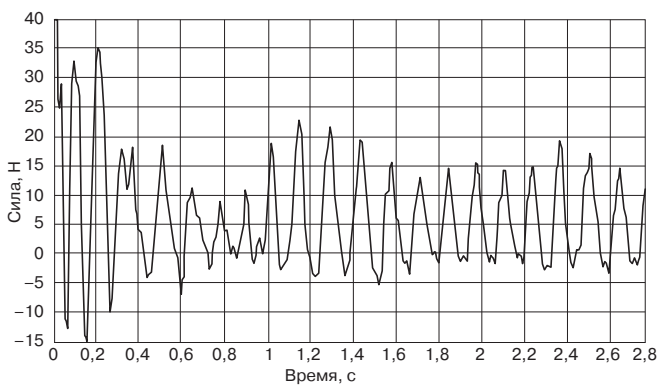


Рис. 6. Зависимость мгновенных значений вертикальной аэродинамической силы, возникающей на изолированном полозе, от времени при решении задачи в нестационарной постановке на скорости набегающего потока 40 м/с

Fig. 6. Time dependence of the instantaneous values of the vertical aerodynamic force arising on an isolated head when solving the problem in a non-stationary formulation at a speed of the relative air flow of 40 m/s

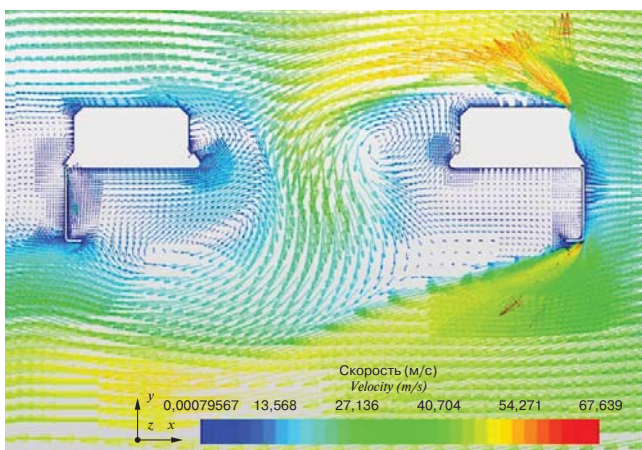


Рис. 7. Характерные векторные поля течения скорости набегающего потока в диапазоне от 20 до 40 м/с в плоскости симметрии полоза, приблизительно соответствующие наибольшим значениям вертикальной аэродинамической силы на полозе

Fig. 7. Characteristic velocity vector fields of the relative air flow in the range from 20 to 40 m/s in the plane of symmetry of the head, approximately corresponding to the largest values of the vertical aerodynamic force on the head

При моделировании полоза токоприемника решалась задача обтекания изолированного полоза в стационарной и нестационарной постановке со скоростью набегающего потока 40 м/с. В рассматриваемой области $5 \times 5 \times 10$ м построена расчетная гексагональная сетка размерностью около 7 млн ячеек, включающая дополнительное разрешение пограничного слоя с помощью слоя призматических ячеек (рис. 5). Применялась стандартная универсальная модель турбулентности « $k-\varepsilon$ », дающая приемлемую точность при решении подобных задач для расчета течения в свободном потоке. Характерный размер ячеек расчетной гексагональной сетки составил от 80 мм (дальнее поле течения) до 0,5 мм (на поверхности тела).

Рассматривалось поведение подъемной вертикальной аэродинамической силы, возникающей на полозе. Сходимость решения контролировалась поведением невязок уравнений газодинамики и значений исследуемого параметра (вертикальной силы).

Результатом решения задачи в нестационарной постановке стала зависимость мгновенных значений вертикальной аэродинамической силы от времени (рис. 6). Анализ показал, что на скорости набегающего потока 40 м/с аэродинамическая сила на изолированном полозе периодически меняется в диапазоне ± 20 Н с частотой 6–7 Гц после 1 с колебаний. На рис. 7 видны характерные векторные поля течения скорости в рассматриваемом диапазоне от 20 до 40 м/с в плоскости симметрии полоза, приблизительно соответствующие наибольшим значениям вертикальной аэродинамической силы на полозе. Поля воздушных потоков, показанных на рис. 7, могут иметь различное направление при одних и тех же начальных условиях, что объясняет изменение аэродинамической силы, действующей на полз с частотой 6–7 Гц.

Результатом решения задачи в стационарной постановке стало значение силы 20 Н при больших значениях невязок. В итоге получилось, что решение задачи в стационарной постановке привело к получению средней аэродинамической силы на элементе, но при значительно меньших вычислительных затратах. На этом этапе было принято решение дальнейшие расчеты полной компоновки токоприемника проводить именно в стационарной постановке.

Влияние на износ токосъемных элементов изменений, внесенных в конструкцию токоприемника. Таким образом, моделирование аэродинамических параметров элементов токоприемника типа ЛА 19 с использованием метода вычислительной гидродинамики показало, что при скорости движения около 140 км/ч (38,9 м/с) возникают колебания полоза, значительно изменяющие контактное нажатие. Это означает, что при движении возникают вертикальные колебания,

изменяющие силу нажатия от +35 до –15 Н с частотой 6–7 Гц, что приводит к повышенному механическому износу вставок. Математическое моделирование позволило объяснить причину повышенного износа вставок при запуске в эксплуатацию электропоезда ЭС2Г на участке Москва—Тверь. При нормативном пробеге токосъемных вставок 40 тыс. км их пробег на линии не превышал 5 тыс. км. Хотя в других условиях (более низких скоростях) пробег составлял требуемые 40 тыс. км.

Наличие держателя приводит к некоторой «стабилизации» течения в целом, амплитуда колебаний вертикальной силы значительно уменьшается, частота увеличивается, а усредненное по времени значение подъемной силы при скорости набегающего потока 40 м/с составляет от 45 до 55 Н в зависимости от направления движения.

На основании проведенного математического моделирования были внесены изменения в конструкцию полоза токоприемника с целью улучшения его аэродинамических свойств. Были использованы другие токосъемные элементы, позволяющие обеспечить стабильные аэродинамические свойства полоза в заданном диапазоне скоростей. Внесенные изменения позволили решить проблему с повышенным износом вставок при скорости движения более 120 км/ч и обеспечить требуемые показатели.

Выводы. Для определения влияния на качество токосъема аэродинамических показателей токоприемника в диапазоне до 160 км/ч была разработана методика расчета аэродинамических сил с применением математического моделирования методом вычислительной гидродинамики. Поскольку на изменение контактного нажатия влияет вертикальная составляющая, то при моделировании изучался именно этот параметр.

Проведенные исследования показали, что при скорости движения в диапазоне от 60 до 160 км/ч происходит повышенный износ токосъемных элементов. Причиной этого износа, как показало математическое моделирование, стали колебания полоза токоприемника в диапазоне скоростей от 76 до 144 км/ч.

Действующие нормативы не определяют требований к аэродинамическим параметрам токоприемника, регламентируется только среднее значение аэродинамического воздействия на токоприемник в целом. В связи с развитием высокоскоростного движения целесообразно проводить исследования по выбору аэродинамических свойств различных частей токоприемника. Проведенные исследования позволят обосновать выбор аэродинамических свойств токоприемников и внести соответствующие изменения в ГОСТ 32204–2013, что повысит надежность и долговечность работы устройств токосъема.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 ноября 2013 г. № 1477-ст: дата введения 2014-06-01. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.
2. Купцов Ю. Е. Беседы о токосъеме, его надежности, экономичности и о путях совершенствования. М.: Модерн-А, 2001. 256 с.
3. Маслов Г. П., Кузнецов А. К. Теоретический метод оценки аэродинамических свойств токоприемников // Повышение качества токоснимания при высоких скоростях движения и в условиях БАМа: межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск: ОмИИТ, 1981. С. 17–20.
4. Ikeda M., Mitsumoji T. Numerical estimation of aerodynamic interference between panhead and articulated frame // Quarterly Report of RTRI. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 227–232.
5. Широкова А. В. Приближенный метод аналитической оценки аэродинамических показателей полозов коробчатого сечения токоприемников подвижного состава магистральных электрических железных дорог: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Омск: ОмГУПС, 2002. 16 с.
6. Теоретический метод оценки аэродинамических свойств токоприемников / В. П. Михеев [и др.] // Энергоснабжение электрических дорог: науч. тр. Омского ин-та инж. ж.-д. транспорта. Омск: ОмИИТ, 1974. Т. 162. С. 11–20.
7. Ли В. Н. Исследование аэродинамических свойств токосъемных устройств с помощью установок Омского полигона // Повышение качества токоснимания при высоких скоростях движения и в условиях БАМа: межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск: ОмИИТ, 1983. С. 74–80.
8. Suzuki M., Ikeda M., Koyama T. Flow control on pantograph with air intake and outlet // Quarterly Report of RTRI. 2007. Vol. 48, no. 4. P. 236–239.
9. Some Considerations on the Aerodynamics of High Speed Pantograph: CFD and Wind Tunnel Tests [Электронный ресурс] / R. Gregoire [et al.] // BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, 20–24 July 2008. Milano, 2008. P. 1–4. URL: http://bbaa6.mecc.polimi.it/uploads/abstract_files/PST_PANTO_STAMPA99.pdf (дата обращения: 22.01.2021).
10. Совершенствование методики аэродинамических испытаний токоприемника путем учета плотности воздушной среды / А. Н. Смердин [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 6. С. 328–333. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-328-333>.
11. Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Pantograph with the Optimized Panhead Shape [Электронный ресурс] / Y. Lee [et al.] // Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics. Moscow, Russia, 20–22 August 2009. [S. l.], 2009. P. 84–88. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/moscow/FMA/FMA11.pdf> (дата обращения: 28.07.2021).
12. Беляев И. А., Михеев В. П., Шиян В. А. Токосъем и токоприемники электроподвижного состава / под ред. И. А. Беляева. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: Транспорт, 1976. 184 с.
13. Yao Sh., Guo D., Yang G. The influence of pantograph aerodynamic characteristics caused by its shroud // Proceedings of the 1st LWHIR / Y.-Q. Ni and X.-W. Ye (Eds.). Berlin: Springer-Verlag, 2012. Vol. 2. LNEE 148. P. 41–52.
14. Вологин В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети. М.: Интекст, 2006. 256 с.
15. Sebesan I., Arsene S. Study on aerodynamic resistance to electric rail vehicles generated by the power supply [Электронный ресурс] // INCAS Bulletin. 2014. Vol. 6, Special Issue 1. P. 151–158. URL: http://bulletin.incas.ro/files/sebesan_i_arsene_s_vol_6_spec_iss_1.pdf (дата обращения: 22.01.2021).

16. Стариков А. П. Повышение качества токосъема при воздействии многокомпонентного воздушного потока на токоприемники магистрального электрического подвижного состава: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Омск: ОмГУПС, 2006. 16 с.

17. Чепурко А. В. Повышение качества токосъема при высоких скоростях движения путем обеспечения рациональной аэродинамической характеристики токоприемника электроподвижного состава: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Омск: ОмГУПС, 2015. 19 с.

18. Ецков Т. А. Асимметричный токоприемник с улучшенными динамическими показателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. Новочеркасск: НПИ, 2018. 20 с.

REFERENCES

1. GOST 32204–2013. Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Current collectors of railway electric rolling stock. General specifications]. Int. standard. Introduced as Russian nat. standard on November 8, 2013 No. 1477-st: introduction date 2014-06-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 24 p. (In Russ.).
2. Kuptsov Yu. E. Besedy o tokos"eme, ego nadezhnosti, ekonomichnosti i o putyakh sovershenstvovaniya [Conversations about the current collection, its reliability, efficiency and ways to improve]. Moscow: Modern-A Publ.; 2001. 256 p. (In Russ.).
3. Maslov G. P., Kuznetsov A. K. Teoreticheskiy metod otsenki aerodinamicheskikh svoystv tokopriemnikov [Theoretical method for assessing the aerodynamic properties of current collectors]. Povyshenie kachestva tokosnimaniya pri vysokikh skorostyakh dvizheniya i v usloviyakh BAMA [Improving the quality of current collection at high speeds and under BAM conditions]. Omsk: OmiIT Publ.; 1981. P. 17–20. (In Russ.).
4. Ikeda M., Mitsumoto T. Numerical estimation of aerodynamic interference between pantograph and articulated frame. *Quarterly Report of RTRI*. 2009;50(4):227–232.
5. Shirokova A. V. Priblizhennyi metod analiticheskoy otsenki aerodinamicheskikh pokazateley polozov korobchatogo secheniya tokopriemnikov podvizhnogo sostava magistral'nykh elektricheskikh zheleznikh dorog [Approximate method of analytical evaluation of the aerodynamic performance of box-section heads of pantographs of the rolling stock of main electric railways]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.22.07. Omsk: OmGUPS Publ.; 2002. 16 p. (In Russ.).
6. Mikheev V. P., Maslov G. P., Bryukhanov A. S., Kuznetsov A. K. Teoreticheskiy metod otsenki aerodinamicheskikh svoystv tokopriemnikov [Theoretical method for assessing the aerodynamic properties of current collectors]. Energosnabzhenie elektricheskikh dorog: nauch. tr. Omskogo in-ta inzh. zh.-d. transporta [Energy supply of electric roads: Procs. of Omsk Institute of Engineering Railway Transport]. Omsk: OmiIT Publ.; 1974. Vol. 162. P. 11–20. (In Russ.).
7. Li V. N. Issledovanie aerodinamicheskikh svoystv tokos"emnykh ustroystv s pomoshch'yu ustanovok Omskogo poligona [Study of the aerodynamic properties of current-collecting devices with the help of installations of the Omsk test site]. Povyshenie kachestva tokosnimaniya pri vysokikh skorostyakh dvizheniya i v usloviyakh BAMA [Improving the quality of current collection at high speeds and under BAM conditions]. Omsk: OmiIT Publ.; 1983. P. 74–80. (In Russ.).
8. Suzuki M., Ikeda M., Koyama T. Flow control on pantograph with air intake and outlet. *Quarterly Report of RTRI*. 2007;48(4):236–239.
9. Gregoire R., Collina A., Resta F., Rocchi D. Some Considerations on the Aerodynamics of High Speed Pantograph: CFD and Wind Tunnel Tests. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, July 20–24, 2008. Milano, 2008. P. 1–4. URL: http://bbaa6.mecc.polimi.it/uploads/abstract_files/PST_PANTO_STAMPA99.pdf (access date: 22.01.2021).

10. Smerdin A. N., Chepurko A. E., Sidorov O. A., Mironos N. V. Sovershenstvovanie metodiki aerodinamicheskikh ispytaniy tokopriemnika putem ucheta plotnosti vozduшной sredy [Improved methods of aerodynamic testing of current collector by considering ambient air density]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science*. 2016;75(6):328–333. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-328-333>. (In Russ.).

11. Lee Y., Rho J., Kwak M., et al. Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Pantograph with the Optimized Panhead Shape. Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics. Moscow, Russia, August 20–22, 2009. [S. I.], 2009. P. 84–88. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/moscow/FMA/FMA11.pdf> (access date: 28.07.2021).

12. Belyaev I. A., Mikheev V. P., Shiyani V. A. Tokos"em i tokopriemniki elektropodvizhnogo sostava [Current collection and current collectors of electric rolling stock]. 2nd ed. Moscow: Transport Publ.; 1976. 184 p. (In Russ.).

13. Yao Sh., Guo D., Yang G., Ni Y.-Q. and Ye X.-W., eds. The influence of pantograph aerodynamic characteristics caused by its shroud. Proceedings of the 1st LWHIR. Berlin: Springer-Verlag; 2012. Vol. 2. LNEE 148. P. 41–52.

14. Volgin V. A. Vzaimodeystvie tokopriemnikov i kontaktной seti [Interaction of current collectors and contact networks]. Moscow: Intext Publ.; 2006. 256 p. (In Russ.).

15. Sebesan I., Arsene S. Study on aerodynamic resistance to electric rail vehicles generated by the power supply. *INCAS Bulletin*. 2014;6(1):151–158. URL: http://bulletin.incas.ro/files/sebesan_i_arsene_s_vol_6_spec_iss_1.pdf (access date: 22.01.2021).

16. Starikov A. P. Povyshenie kachestva tokos"ema pri vozdeystvii mnogokomponentnogo vozduшной potoka na tokopriemniki magistral'nogo elektricheskogo podvizhnogo sostava [Improving the quality of current collection under the influence of a multicomponent air flow on the current collectors of the main electric rolling stock]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.22.07. Omsk: OmGUPS Publ.; 2006. 16 p. (In Russ.).

17. Chepurko A. V. Povyshenie kachestva tokos"ema pri vysokikh skorostyakh dvizheniya putem obespecheniya ratsional'noy aerodinamicheskoy kharakteristiki tokopriemnika elektropodvizhnogo sostava [Improving the quality of current collection at high speeds by providing rational aerodynamic characteristics of the current collector of electric rolling stock]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.22.07. Omsk: OmGUPS Publ.; 2015. 19 p. (In Russ.).

18. Etskov T. A. Assimetrichny tokopriemnik s uluchshennymi dinamicheskimi pokazatelyami [Asymmetric pantograph with improved dynamic performance]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.09.01. Novocherkassk: NPI Publ.; 2018. 20 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николай Васильевич МИРОНОС,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, отдел «Контактная сеть и токосъем», центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 384806, <https://orcid.org/0000-0002-1100-7326>

Марина Николаевна ЕМЕЛЬЯНОВА,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел «Контактная сеть и токосъем», центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, emelyanova.marina@vniizht.ru), Author ID: 722686, <https://orcid.org/0000-0002-3956-3033>

Денис Викторович ТАРТЫНСКИЙ,

начальник испытательного центра, Софрино Электротранспорт (С Электротранспорт, 141270, Московская обл., пос. Софрино, ул. Патриарха Пимена, д. 77, tartynskiy@seltrans.ru), Author ID: 722708

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. MIRONOS,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Contact Network and Current Collection Department, Electrification and Heat Power Engineering Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID : 384806, <https://orcid.org/0000-0002-1100-7326>

Marina N. Emel'yanova,

Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Contact Network and Current Collection Department, Electrification and Heat Power Engineering Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., emelyanova.marina@vniizht.ru), Author ID: 722686, <https://orcid.org/0000-0002-3956-3033>

Denis V. TARTYNSKIY,

Head of the testing centre, Sofrino Electric Transport (141270, Moscow region, Sofrino, 77, Patriarkha Pimena St., tartynskiy@seltrans.ru), Author ID: 722708

ВКЛАД АВТОРОВ

Николай Васильевич МИРОНОС. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, методика расчета аэродинамических сил с применением математического моделирования методом вычислительной гидродинамики, обоснование влияния на износ токосъемных элементов изменений, внесенных в конструкцию токоприемника (40 %).

Марина Николаевна ЕМЕЛЬЯНОВА. Анализ результатов испытаний, обзор основных направлений по изучению влияния аэродинамических параметров токоприемника на токосъем, анализ результатов математического моделирования методом вычислительной гидродинамики (30 %).

Денис Викторович ТАРТЫНСКИЙ. Организация и проведение испытаний, измерение аэродинамических параметров, выбор конструкции полоза токоприемника с целью изменения его аэродинамических свойств (30 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Nikolay V. MIRONOS. Formation of the direction of research, formulation of goals and objectives, calculating aerodynamic forces using mathematical modelling by the method of computational fluid dynamics, substantiation of the effect of changes made to the design of the pantograph on the wear of current collector elements (40 %).

Marina N. Emel'yanova. Analysis of the test results, review of the main directions for studying the influence of the aerodynamic parameters of the pantograph on the current collection, analysis of the results of mathematical modelling by the method of computational fluid dynamics (30 %).

Denis V. TARTYNSKIY. Organisation and conduct of tests, measurement of aerodynamic parameters, selection of the pantograph head design in order to change its aerodynamic properties (30 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.10.2021, первая рецензия получена 21.10.2021, вторая рецензия получена 08.06.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 21.10.2021, first review received 21.10.2021, second review received 08.06.2022, accepted for publication 29.08.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

.....

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239

EDN: <https://elibrary.ru/cecenc>



АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЕМ КОЛЕСНЫХ ПАР ГРУЗОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

А. Н. Савоськин¹, Н. Д. Шилин²✉

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. С каждым годом на сети железных дорог РФ непрерывно возрастает количество электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями, так как такой тяговый привод имеет ряд преимуществ перед приводом с двигателями постоянного тока. Одной из проблем, связанной с внедрением асинхронных двигателей и повышением массы составов поездов, является реализация максимальной силы тяги электровозом на границе сцепления колес с рельсами. Своевременное распознавание избыточного скольжения колесных пар является важнейшим показателем эффективности тягового привода при реализации максимальных тяговых свойств электровоза всеми осями.

Материалы и методы. В статье отражены результаты исследования параметров скольжения колесных пар электровоза с асинхронными тяговыми двигателями и поосным управлением силой тяги, полученных в ходе проведения опытных поездок на участке железной дороги при различных условиях сцепления. Представлена методика исследования срывов сцепления колесных пар электровозов с асинхронными тяговыми двигателями.

Результаты. В ходе сравнения полученных экспериментальных результатов с расчетными параметрами математической модели О. Polach приведен уточненный диапазон относительного скольжения колесных пар, в котором система управления электровозом может реализовать максимальную силу тяги. Превышение этого диапазона приведет к повышенному износу колесных пар без повышения тяговых свойств.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования целесообразно использовать в дальнейшем при разработке систем управления силой тяги на пределе по сцеплению и систем управления скольжением колесных пар грузовых электровозов с асинхронными тяговыми двигателями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, коэффициент сцепления, скольжение, асинхронный тяговый двигатель, сила сцепления, система колесо–рельс, сила тяги

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Савоськин А. Н., Шилин Н. Д. Анализ управления скольжением колесных пар грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 230–239. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239>.

✉ shilin.nikita@vniizht.ru (Н. Д. Шилин)

© Савоськин А. Н., Шилин Н. Д., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239

EDN: <https://elibrary.ru/cecenc>



ANALYSIS OF WHEEL PAIRS SLIP CONTROL OF ELECTRIC FREIGHT LOCOMOTIVE WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS

Anatoliy N. Savos'kin¹, Nikita D. Shilin²✉

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Every year, the amount of electric rolling stock with asynchronous traction motors is continuously increasing on the Russian railway network, since such traction drives have a number of advantages over drives with DC motors. One of the problems associated with the introduction of asynchronous motors and an increase in the mass of trains is the implementation of the maximum traction force by an electric locomotive at the threshold in terms of wheel – rail adhesion. Timely recognition of excessive slip of wheel pairs is the most important indicator of the efficiency of the traction drive in realising the maximum traction properties of the electric locomotive at all axles.

Materials and methods. The article reflects the results of the study of slip of electric locomotive wheel pairs with asynchronous traction motors and axial control of the traction force, obtained during experimental runs on a railway section under various adhesion conditions. The article presents a technique for studying the wheel pair adhesion failure of electric locomotives with asynchronous traction motors.

Results. During the comparison of the obtained experimental results with the calculated parameters by the O. Polach mathematical model, an updated range of the relative slip of wheel pairs is given, in which the electric locomotive control system could realise the maximum tractive effort. Exceeding this range will lead to increased wear of wheel pairs without increasing traction properties.

Discussion and conclusion. It is advisable to use the results of the study in the future when developing systems for controlling the tractive effort at the limit of adhesion and systems for controlling the slip of wheel pairs of electric freight locomotives with asynchronous traction motors.

KEYWORDS: electric locomotive, friction coefficient, slip, asynchronous traction motor, adhesion force, wheel – rail system, traction force

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Savos'kin A.N., Shilin N.D. Analysis of wheel pairs slip control of electric freight locomotive with asynchronous traction motors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):230-239. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-230-239>.

Введение. В силу ряда известных преимуществ все большее распространение в настоящее время получают грузовые электровозы с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). По состоянию на 2022 г. на сети железных дорог РФ эксплуатируется более 350 локомотивов с АТД, из них 180 грузовых электровозов. Такие электровозы оборудованы тяговыми двигателями мощностью более 1000 кВт и поосным регулированием силы тяги, что позволяет им при трогании с места реализовать силу тяги более 750 кН.

На зарубежных электровозах также внедряются алгоритмы потележного и поосного регулирования силы тяги АТД. Так, на электровозах типа KZ4A Казахстанских железных дорог были применены системы с потележным управлением силой тяги, однако в дальнейшем их модифицировали на поосное управление силой тяги.

Повышение тяговой мощности электровозов непременно приводит к появлению граничных условий по сцеплению при реализации максимальной силы тяги. В настоящее время существует множество отечественных и зарубежных теоретических и практических исследований по теме повышения коэффициента сцепления колес с рельсами. Помимо применения подсыпки кварцевого песка под колесные пары (КП) на электроподвижном составе внедряют системы управления скольжением КП на пределе по сцеплению [1–4]. На основе проведенного анализа работ различных авторов было установлено, что при снижении коэффициента сцепления, например, при наезде на масляное пятно или иное загрязнение, максимум сцепления может находиться в разных диапазонах

скоростей скольжения. При движении по чистым рельсам или рельсам с небольшими загрязнениями максимум сцепления реализуется при значительно меньшей скорости скольжения $v_{ск}$, чем при замасленных рельсах [1, 5–8]. Таким образом, для максимального эффективного использования сил сцепления необходимо регулировать относительную скорость скольжения в некотором диапазоне в зависимости от текущих условий сцепления.

Так, например, в [6–9] показано, что зависимость коэффициента сцепления $\psi_{сц}$ от относительной скорости скольжения ε и линейной скорости движения электровоза v с АТД по сухим рельсам можно представить в виде поверхности (рис. 1) с проекцией максимального коэффициента сцепления во всем диапазоне линейной скорости (линия I). Видно, что при скорости движения электровоза от 0 до 10 км/ч и максимуме коэффициента сцепления относительная скорость скольжения $\varepsilon = v_{ск} / v \cdot 100\%$ может достигать 10–15%, в то время как при скорости движения выше 60 км/ч максимум коэффициента сцепления достигается при относительной скорости скольжения, не превышающей 2,5–3%.

Кроме того, выполненные исследования [3, 5–8] показали, что зависимости коэффициента сцепления от скорости скольжения на загрязненных рельсах (с остатками на поверхности рельса масляных пятен и пыли) и рельсах с водой или снегом на поверхности катания для электровозов с АТД будут иметь схожую форму, однако из-за снижения фрикционных свойств в зоне контакта колеса и рельса реализуемые величины $\psi_{сц}$ будут на 20–50% ниже, а величины ε — выше тех, что представлены на рис. 1 (при движении по сухим и чистым рельсам).

Основная особенность электровозов с АТД и поосным управлением силой тяги заключается в том, что их тяговая характеристика имеет два участка (рис. 2) [10]: в виде прямой линии участок $A-A_1$, соответствующий характеристике постоянства силы тяги (момента), и участок A_1-B , соответствующий характеристике постоянства мощности и имеющий вид гиперболы. Переход на характеристику постоянства мощности происходит после достижения номинальной мощности тяговых двигателей. Кроме того, на участке постоянства силы тяги может быть реализована так называемая бустерная (усиленная) характеристика (кривая I), соответствующая полчасовому режиму работы с повышенной мощностью тяговых двигателей, что дает электровозу дополнительные преимущества при реализации предельной силы тяги в условиях неблагоприятного сцепления колес с рельсами.

Следует отметить, что именно на участках $A-A_1$ характеристик постоянства силы тяги и скорости движения до 50 км/ч преимущественно происходит движение электровоза на пределе по сцеплению с

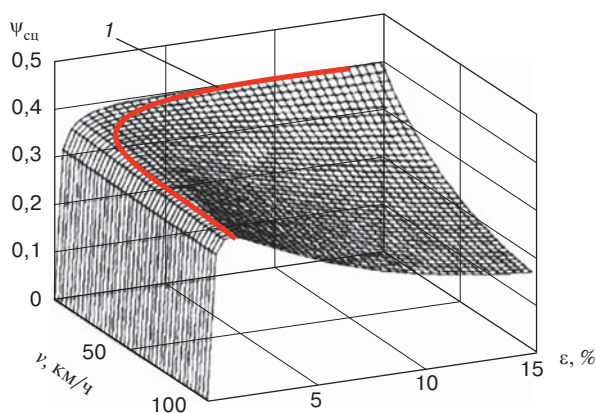


Рис. 1. Диаграмма зависимости коэффициента сцепления КП $\psi_{сц}$ от относительной скорости скольжения КП и скорости движения электровоза:
 I — максимум коэффициента сцепления

Fig. 1. Diagram of the dependence of the friction coefficient of the wheel pair $\psi_{сц}$ on the relative slipping speed of the wheel pair and electric locomotive speed:
 I — maximum friction coefficient

возникновением боксований с высокими скоростями относительного скольжения $\varepsilon \geq 5\%$.

Длительное движение электровоза с такими относительными скоростями скольжения может привести к нагреву рельса и поверхности бандажа до температур $t \geq 700^\circ\text{C}$ [1]. Температура 700°C является критической для фазового состояния стали, и ее превышение ведет к выделению на поверхности колеса хрупкой мартенситовой фазы и появлению трещин или вырывов металла (рис. 3). Поэтому алгоритм управления скоростью скольжения, заложенный в систему автоматического управления (САУ) тяговым приводом, не должен допускать длительного движения электровоза с такими скоростями относительного скольжения.

Таким образом, для обеспечения нормальных условий эксплуатации электровозов с АД необходимо обосновать способы управления силой тяги двигателей, исключающие движение электровоза с повышенными значениями ε , а также методы выявления боксований и способы вычисления линейной скорости электровоза.

Методика исследования срывов сцепления КП электровозов. Для изучения процессов, возникающих при реализации максимальных тяговых усилий ныне эксплуатируемых электровозов с АД, авторами были проведены исследования их тяговых и сцепных свойств в процессе испытаний. Опытные поездки проводились для электровоза на участке железной дороги с большим количеством руководящих подъемов крутизной 6–12‰, длиной более 10 км, а также с большим количеством кривых, в том числе малого радиуса (300–500 м). Масса поезда, установленная для двухсекционных электровозов с АД на участке проведения опытных поездок, составляет 6200 т.

Тягово-энергетические параметры АД электровоза определялись посредством прямых измерений токов и напряжений тяговых двигателей. Окружные скорости вращения КП $v_{\text{кп}}^i$ определялись путем регистрации импульсных сигналов с боксовых датчиков пройденного пути и скорости, установленных на всех осях электровоза. Линейная скорость движения v определялась с помощью боксового датчика вагона-лаборатории, включенного в состав поезда.

Полученные данные использовались для расчета активной мощности тяговых двигателей секции электровоза $P_{\text{тд}}^i$ и преобразования ее в силу тяги $F_{\text{ктд}}^i$ (электрического торможения), приведенную к ободу КП. Электрические величины измерялись аналого-цифровыми преобразователями и записывались в энергонезависимую память измерительной системы [11].

Усредненные значения мощности $P_{\text{тд}}^i$ и касательных сил $F_{\text{ктд}}^i$ на ободе колес тяговых двигателей и силы тяги секции электровоза $F_{\text{к}}$ определялись по следующей формулам:

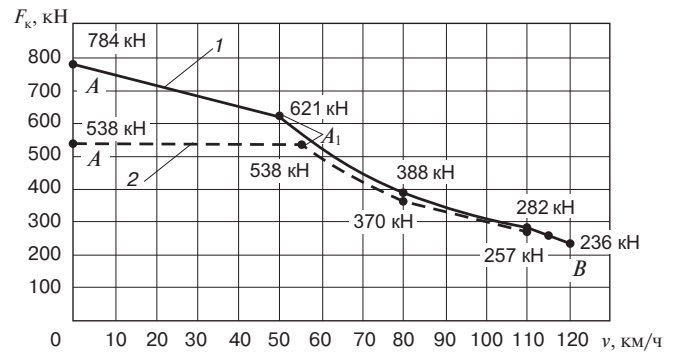


Рис. 2. Тяговая характеристика электровоза с АД [10]:
1 — максимальная характеристика; 2 — длительная характеристика

Fig. 2. Traction characteristic of an electric locomotive with asynchronous traction motors [10]:
1 — maximum characteristic; 2 — long-term characteristic



Рис. 3. Фрагмент бандажа КП электровоза с дефектом в виде вырыва металла на поверхности катания

Источник: <https://mydocx.ru/7-88701.html>

Fig. 3. Fragment of a bandage of a wheel pair of an electric locomotive with a defect in the form of tearing of metal on the tread surface

Source: <https://mydocx.ru/7-88701.html>

$$P_{\text{тд}} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{ACi} I_{Ai} + U_{BCi} I_{Bi})}{N}; \quad (1)$$

$$F_{\text{ктд}}^i = 3,6 \frac{P_{\text{тд}}^i \eta_{\text{тд}} \eta_{\text{зп}}}{v_{\text{кп}}^i}; \quad (2)$$

$$F_{\text{к}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{ктд}}^i n_{\text{тд}}; \quad (3)$$

где U_{ACi} и U_{BCi} — линейное напряжение между фазами A—C и B—C, В; I_{Ai} и I_{Bi} — токи фаз A и B, А; N — количество мгновенных измерений за интервал времени t ;

$\eta_{\text{тд}}$ — КПД двигателя; $\eta_{\text{зп}}$ — КПД зубчатой передачи; $v_{\text{кпи}}$ — скорость вращения i -й КП, км/ч; i — порядковый номер КП; $n_{\text{тд}}$ — количество тяговых двигателей на секцию электровоза ($n_{\text{тд}} = 4$), шт.; n — количество КП электровоза.

Силы электрического торможения одного тягового двигателя и одной секции электровоза рассчитывались по аналогичным формулам:

$$B_{\text{тди}} = \frac{3,6 P_{\text{тди}}}{v_{\text{кпи}} \eta_{\text{тд}} \eta_{\text{зп}}}; \quad (4)$$

$$B_{\text{к}} = \sum_{i=1}^n B_{\text{тди}} n_{\text{тд}}. \quad (5)$$

Абсолютная скорость скольжения каждой КП определялась как

$$v_{\text{ски}} = v_{\text{кпи}} - v. \quad (6)$$

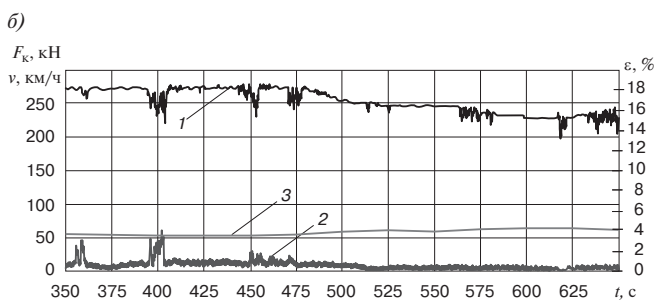
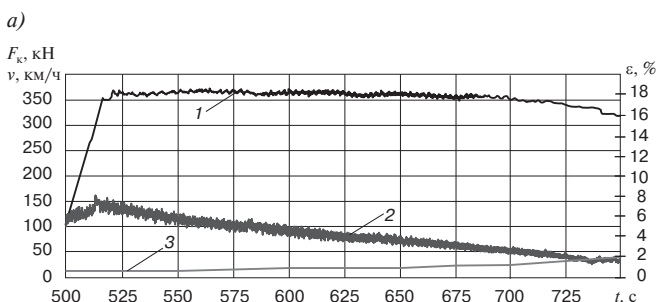


Рис. 4. Осциллограммы зависимостей силы тяги секции электровоза $F_{\text{к}}(t)$, скоростей скольжения i -х КП $v_{\text{ски}}(t)$ и $\varepsilon_i(t)$, а также линейной скорости движения $v(t)$ на различных участках тяговой характеристики:

а — характеристика при постоянстве силы тяги; б — характеристика при постоянстве мощности: 1 — сила тяги одной секции; 2 — относительная скорость скольжения первой КП ε_1 ; 3 — линейная скорость движения электровоза

Fig. 4. Oscillograms of the dependencies of the tractive effort of the section of the electric locomotive $F_{\text{к}}(t)$, the slipping speeds of i -th wheel pairs $v_{\text{ски}}(t)$ and $\varepsilon_i(t)$, as well as the linear speed of movement $v(t)$ in different parts of the traction characteristic:

а — characteristic at constant tractive effort; б — characteristic at constant power: 1 — tractive effort of one section; 2 — relative slipping speed of the first wheel pair ε_1 ; 3 — linear speed of the electric locomotive

Коэффициент тяги $k_{\text{т}}$ одной секции электровоза рассчитывался следующим образом:

$$k_{\text{т}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{кпи}} / P_{\text{ди}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ди}}$ — динамическая нагрузка на рельс от одной КП, кН.

Представленные выше формулы и выполненные расчеты применимы для электровозов с неизношенными бандажами КП, имеющими диаметр по кругу катания $d_{\text{к}} = 1250$ мм. В случае изменения диаметров бандажей колес в расчетах сил тяги/торможения необходимо все силы и скорости приводить к реальному диаметру бандажей КП:

$$v' = v d'_{\text{к}} / d_{\text{к}}, \quad (8)$$

где $d'_{\text{к}}$ — реальный (изношенный) диаметр бандажа КП по кругу катания, мм.

Обработка полученных первичных данных, а также расчеты по формулам (1)–(8) производились в программных пакетах MatLab и Microsoft Excel с последующим представлением в графическом виде.

Описанная методика измерений и расчетов параметров движения электровоза позволяет в полной мере оценить процессы появления и развития боксования КП, возникающие во время движения, а также исследовать алгоритмы и качество работы системы защиты электровоза от боксования.

Результаты исследований. Опытные поездки электровоза производились зимой при выпадении осадков в виде снега. На рис. 4 представлены осциллограммы зависимостей силы тяги секции электровоза $F_{\text{к}}(t)$, линейной скорости движения $v(t)$, а также скоростей скольжения i -х КП $v_{\text{ски}}(t)$ и $\varepsilon_i(t)$ на различных участках тяговой характеристики.

При разгоне электровоза в диапазоне от 10 до 25 км/ч с ростом скорости сила тяги секции электровоза остается неизменной и находится на уровне 360 кН, что говорит о работе электровоза в зоне постоянства силы тяги (рис. 4, а). При скорости движения электровоза свыше 45 км/ч сила тяги постепенно снижается из-за перехода на характеристику постоянства мощности (рис. 4, б). Так, например, с ростом скорости от 50 до 62 км/ч сила тяги секции электровоза снизилась примерно на 40 кН. При этом в диапазоне скоростей 50–55 км/ч были зафиксированы частые срывы сцепления КП с рельсами. Поэтому этот диапазон скоростей был выбран для дальнейших исследований как наиболее наглядно отражающий работу алгоритмов управления сцеплением при возникновении частых боксований. Также стоит отметить, что при движении на участке характеристики постоянства силы тяги относительная скорость скольжения первой КП ε_1 находилась в диапазоне от 4 до 7 %

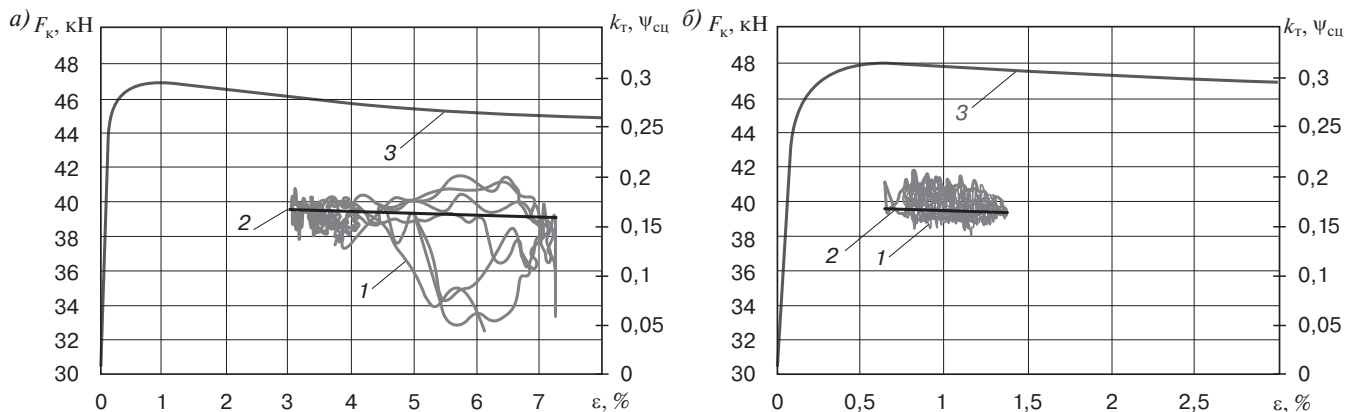


Рис. 5. Зависимости силы тяги от относительных скоростей скольжения для первой (а) и второй (б) КП на участке постоянства силы тяги тяговой характеристики:

1 — фазовые траектории силы тяги КП $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$; 2 — усредненная зависимость коэффициента тяги $k_{тi}(\varepsilon)$; 3 — зависимость коэффициента сцепления $\psi_{сц}(\varepsilon)$, по данным О. Polach [6]

Fig. 5. Dependences of the tractive effort on the relative slipping speeds for the first (a) and second (b) wheel pairs in the section of constancy of the tractive effort of the traction characteristic:

1 — phase trajectories of the tractive effort of the wheel pair $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$; 2 — average dependence of the traction coefficient $k_{тi}(\varepsilon)$; 3 — dependence of the friction coefficient $\psi_{сц}(\varepsilon)$, according to O. Polach [6]

(рис. 4, а), в то время как на участке постоянства мощности относительная скорость скольжения первой КП снизилась до 1–2% (рис. 4, б).

Полученные значения функций $F_{к\text{тл}}(t)$ и $\varepsilon_i(t)$ в области времени пересчитывались в зависимости силы тяги от относительной скорости скольжения $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$ различных КП (рис. 5). Эти зависимости представляют собой замкнутые линии — фазовые траектории (линии 1) [8, 12, 13] с колебаниями, вызванными неоднородностью физико-химических свойств поверхностей колеса и рельса в процессе боксования. Рассмотрим вначале зависимости $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$, полученные для первой КП на участке постоянства силы тяги тяговой характеристики электровоза, соответствующем движению поезда со скоростями от 20 до 25 км/ч. Фазовые траектории 1, соответствующие этому участку (рис. 5, а), практически «вытянуты» вдоль горизонтальной оси, где $F_k = 32\text{--}41$ кН. При этом изменения относительной скорости скольжения очень велики: они находятся в пределах $2,5\% \leq \varepsilon \leq 7,5\%$ и происходят со значительным снижением силы тяги до 32 кН.

Зависимости $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$, полученные для второй КП в том же диапазоне скоростей (рис. 5, б), также представляют собой фазовые траектории 1, вытянутые вдоль горизонтальной оси, где $F_k = 38\text{--}41$ кН. Диапазон изменения относительной скорости скольжения этой КП значительно меньше, чем у первой КП, и составляет всего $0,5\% \leq \varepsilon \leq 1,5\%$. Также небольшим является и диапазон изменения силы тяги. Это объясняется лучшими условиями сцепления из-за большей статической нагрузки этой КП, вызванной

перераспределением вертикальных статических нагрузок на КП, возникающим при реализации силы тяги [9]. Фазовые траектории третьей и четвертой КП, которые здесь не представлены, оказались близкими к зависимостям для второй КП, что также объясняется большими величинами статических нагрузок этих КП.

На основе этого анализа можно сделать следующий вывод: при движении электровоза на низких скоростях первая КП имеет повышенное скольжение по сравнению с другими КП, что может привести к перегреву поверхностей бандажа и рельса и, как следствие, возникновению повреждений (повышенный износ, вырывы металла и т. п.).

Полученные значения $F_{к\text{тл}}(\varepsilon)$ были пересчитаны в зависимости коэффициентов тяги от относительной скорости скольжения $k_{тi}(\varepsilon)$, которые нанесены на рис. 5 в виде средних значений этих коэффициентов (линия 2). При этом для учета динамического перераспределения сил P_d между КП экипажа во время движения при расчете коэффициента тяги по формуле (7) была применена функция расчета нагрузки каждой оси с учетом реализуемой силы тяги, разработанная авторами во ВНИИЖТ [14]. В расчете значения P_d выбраны согласно экспериментально полученным данным для электровоза 2ЭС6 с измерением дополнительной составляющей разгружающих и догружающих сил нажатия КП на рельс ΔP при движении вперед. При реализации силы тяги от 0 до 55 кН на каждую ось электровоз наезжал на участок рельсового пути с установленными

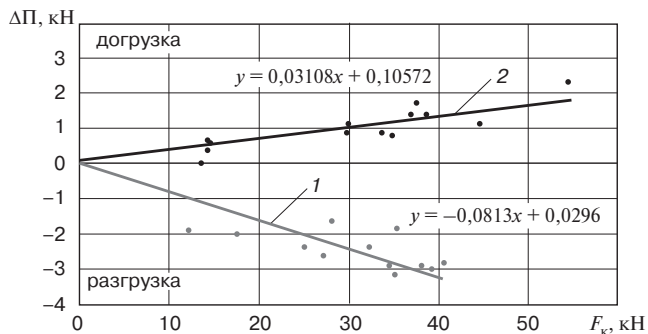


Рис. 6. Динамическая составляющая силы нажатия КП на рельс при реализации касательной силы тяги: 1 — первая КП; 2 — четвертая КП

Fig. 6. The dynamic component of the pressure force the wheel pair on the rail in the implementation of the tangential tractive effort: 1 — first wheel pair; 2 — fourth wheel pair

тензометрическими резисторами, тем самым изменяя напряжение электрического сигнала на выходе измерительной схемы.

На рис. 6 приведены обработанные сигналы в виде зависимости составляющей силы ΔP от силы тяги каждой оси $F_{кдi}$.

Для учета разгрузки первой и третьей оси в тележке рекомендуется формула

$$P_{дi} = P_{ст} - 0,0813F_{кдi} + 0,0296, \quad (9)$$

где $P_{ст}$ — статическая нагрузка на рельс одной оси, кН, $P_{ст} = 245$ кН.

Учет догрузки второй и четвертой оси определяется по формуле

$$P_{дi} = P_{ст} + 0,0311F_{кдi} + 0,106. \quad (10)$$

На основе этого были получены зависимости $k_{тi}(\epsilon)$ для каждой КП, которые нанесены на рис. 5 в виде средних значений этих коэффициентов (линия 2). Кроме того, на рис. 5 нанесена кривая $\psi_{сц}(\epsilon)$, полученная сечением рис. 1 плоскостью $v = \text{const} = 25$ км/ч, — линия 3 с максимальным коэффициентом сцепления 0,34–0,37. Дополнительно были учтены догружающие и разгружающие силы, согласно формулам (9) и (10), в результате чего кривые $\psi_{сц}(\epsilon)$ для первой и второй оси также имеют различную форму. При этом кривые $\psi_{сц}(\epsilon)$ имеют постоянный небольшой наклон коэффициента сцепления в диапазоне $\epsilon = 3 \div 8 \%$.

Характер изменения полученных кривых $k_{тi}(\epsilon)$ и $\psi_{сц}(\epsilon)$ для двух КП получился практически одинаковым — параллельные линии, где коэффициент тяги $k_t = 0,16–0,17$ почти в два раза меньше, чем $\psi_{сц} = 0,31–0,24$. Отличие экспериментальных кривых $k_{тi}(\epsilon)$ от расчетных $\psi_{сц}(\epsilon)$ вызвано различными исходными состояниями поверхностей рельсов при

построении этих кривых. Кривые $\psi_{сц}(\epsilon)$ были получены в [6–8] при моделировании движения по чистым рельсам и отсутствии осадков на поверхности катания в виде снега, дождя или росы, в то время как экспериментальные кривые $k_{тi}(\epsilon)$ получены при движении зимой с наличием снега в рельсовой колее, что значительно снижает реализуемые значения $k_{тi}(\epsilon)$.

При проведении следующего эксперимента на другом участке пути (рис. 7) были зафиксированы частые срывы КП электровоза в боксования при движении на подъеме при работе электровоза на участке постоянства мощности тяговой характеристики. Фазовые траектории 1 здесь также представляют собой замкнутые кривые с диапазоном изменения относительной скорости скольжения у всех четырех КП в пределах $0,5\% \leq \epsilon \leq 3,6\%$. Отдельные провалы силы тяги достигают при этом 15 кН и зафиксированы у второй и четвертой КП. За счет управления скольжением САУ электровоза удалось добиться реализации величины $F_{кдi}$ в диапазоне от 40 до 55 кН каждой КП. Такие особенности этих зависимостей объясняются тем, что электровоз в этом диапазоне скоростей движения работает на участке тяговой характеристики постоянства мощности.

На рис. 7 также видно, что при возникновении боксования сила тяги каждой оси $F_{кдi}$ резко изменяется, что вызвано индивидуальным воздействием на нее САУ. За счет этого скорость скольжения всех КП поддерживается в определенном диапазоне, где ϵ не превышает 4% (или $v_{ск} \sim 2$ км/ч в абсолютном значении).

За время боксования величина $F_{кдi}$ снижалась на 10–20 кН со скоростью $dF/dt = 220–250$ кН/с. Наибольшее снижение силы тяги было зафиксировано у четвертой КП и составило до 20 кН. Такое резкое снижение силы тяги заложено в алгоритм управления САУ приводом четвертой КП для исключения глубоких боксований «опорной» оси и недопущения режима синхронного боксования всех КП электровоза.

Для скорости свыше 45 км/ч так же, как и для низкой скорости движения, а именно на участке постоянства мощности тяговой характеристики, были получены усредненные значения коэффициента тяги для каждой КП (линия 2) по формуле (7) и с учетом догружающих и разгружающих сил по формулам (9)–(10). Полученные значения $k_{тi}(\epsilon)$ практически повторяют форму расчетной кривой коэффициента сцепления $\psi_{сц}(\epsilon)$ (линия 3) для всех КП и находятся в диапазоне от 0,20 до 0,24. Как и при движении на участке постоянства силы тяги, отличие экспериментальных кривых $k_{тi}(\epsilon)$ от расчетных $\psi_{сц}(\epsilon)$ заключается, как уже говорилось, в различных исходных состояниях поверхностей рельсов и коэффициента сцепления, принятых в расчетах.

Стоит отметить, что с ростом скорости движения коэффициент тяги электровоза должен снижаться, однако

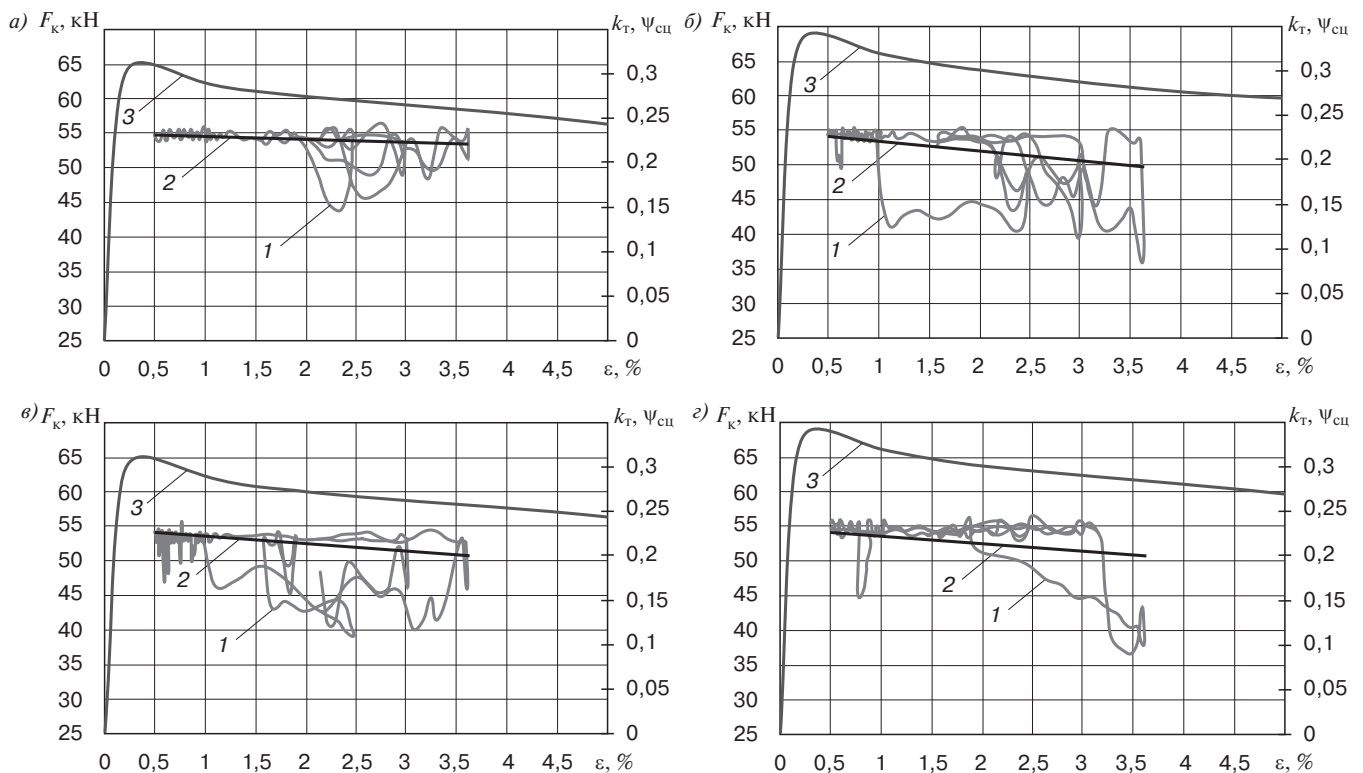


Рис. 7. Зависимости силы тяги от относительных скоростей скольжения для первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) КП на участке постоянства мощности тяговой характеристики: 1 — фазовые траектории силы тяги КП $F_{кдл}(\epsilon)$; 2 — усредненная зависимость коэффициента тяги $k_{ti}(\epsilon)$; 3 — зависимость коэффициента сцепления $\psi_{cu}(\epsilon)$, по данным О. Polach [6]

Fig. 7. Dependences of the tractive effort on the relative slipping speeds for the first (a), second (b), third (c) and fourth (d) wheel pairs in the section of constant power of the traction characteristic: 1 — phase trajectories of the tractive effort of the wheel pair $F_{кдл}(\epsilon)$; 2 — average dependence of the traction coefficient $k_{ti}(\epsilon)$; 3 — dependence of the friction coefficient $\psi_{cu}(\epsilon)$, according to O. Polach [6]

в данном эксперименте он увеличился относительно предыдущего эксперимента с более низкой скоростью (рис. 5). Это объясняется различными условиями сцепления в момент проведения замеров, так как при движении по участку с большей скоростью (рис. 7) условия сцепления значительно улучшились, относительно первого эксперимента (рис. 5), что позволило реализовать большую силу тяги.

Из представленных выше результатов можно сделать вывод о том, что полученные экспериментальные кривые коэффициента тяги $k_{ti}(\epsilon)$ каждой КП как для участка постоянства силы тяги, так и для участка постоянства мощности имеют определенную сходимость с данными, приведенными в [8, 9], что говорит о правильности полученных результатов.

Чаще всего при проведении опытных поездок боксования КП возникали из-за наезда колес на влажные участки рельсов или участки с большим количеством снега на поверхности катания. Такой наезд сопровождался снижением коэффициента сцепления и, как следствие, возникновением боксований, однако САУ

электровоза своевременно распознавала развитие повышенного скольжения КП и регулировала скорости скольжения и момент тяговых двигателей так, чтобы не допустить глубоких разноосных боксований.

Заключение. Средние значения фазовых траекторий, полученных авторами, имеют удовлетворительную сходимость с результатами, полученными в расчетах О. Polach для электровозов с АТД. Различие в результатах объясняется разными начальными условиями исследований. При проведении испытаний условия сцепления в виде выпадения осадков и загрязнений на поверхности рельсов изменялись случайно, в то время как у О. Polach условия сцепления выбраны изначально близкими к идеальным (абсолютно чистые рельсы) и в процессе расчетов не изменялись.

С ростом относительной скорости скольжения коэффициент тяги практически не увеличивается. Это свидетельствует о том, что глубину относительного скольжения КП следует ограничивать в пределах 1–5 %.

Противобоксовочная защита электровоза имеет высокую чувствительность при выявлении срывов сцепления и обеспечивает работу на пределе по сцеплению с реализацией максимального тягового усилия при различных условиях движения с исключением глубоких боксований. Однако для полной оценки эффективности противобоксовочной защиты электровоза с АТД целесообразно проводить исследования во всем климатическом и температурном диапазоне эксплуатации электровозов с целью уменьшения влияния на результат исследований случайных факторов, связанных с сезонными особенностями эксплуатации электровозов.

При разработке перспективных электровозов следует учитывать, что в моменты трогания и разгона электровоза САУ тяговым приводом следует уменьшать силу тяги первой оси так, чтобы скорость ее относительного скольжения не приводила к ускоренному износу бандажей и рельсов. Также необходимо учитывать влияние повышенной силы тяги грузовых электровозов с АТД на силы продольного воздействия в рельсовой колее при реализации максимальных тяговых усилий на бесстыковом пути.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лужнов Ю. М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. М.: Интекст, 2009. 176 с.
2. Меншутин Н. Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1961. 18 с.
3. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива: монография. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 104 с.
4. Logston C. F., Jr., Itami G. S. Locomotive friction-creep studies // *ASME J. Eng. Ind.* 1980. Vol. 102. P. 275–281.
5. Buscher M. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом // *Железные дороги мира*. 1994. № 4. С. 30–45.
6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit // *Wear*. 2005. Vol. 258. P. 992–1000.
7. Polach O. SBB 460 Adhäsionsverhalten, Techn. Report No. 401 / SLM Winterthur. [S. l.], 1992.
8. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse // *Eisenbahningenieur*. 2002. Vol. 53, no. 7. P. 50–57.
9. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
10. Осинцев И. А., Логинов А. А. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10: учеб. пособие. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2015. 332 с.
11. Labview. Руководство пользователя / пер. с англ. С. В. Николаева. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2008. 410 с.
12. Модель взаимодействия колеса и рельса с учетом дискретного строения металла контактирующих тел / Г. П. Бурчак [и др.] // *Вестник машиностроения*. 2019. № 2. С. 21–28.

13. Ляпушкин Н. Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов с различными типами тяговых электродвигателей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. М., 2013. 46 с.

14. Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Поосное перераспределение силы тяги для электровозов с асинхронными тяговыми электродвигателями // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2022. Т. 81, № 2. С. 148–156. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156>.

REFERENCES

1. Luzhnov Yu. M. Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami [Nanotribology of wheel–rail adhesion]. Moscow: Intext Publ.; 2009. 176 p. (In Russ.).
2. Menshutin N. N. Issledovanie skol'zheniya kolesnoy pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi [Investigation of the slipping of an electric locomotive wheel pair in the implementation of traction force]. Cand. Sci. thesis synopsis: 05.00.00. Moscow; 1961. 18 p. (In Russ.).
3. Samme G. V. Friksionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s rel'sami. Teoriya i praktika stsepleniya lokomotiva [Frictional interaction of wheel pairs of a locomotive with rails. Theory and practice of locomotive adhesion]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte Publ.; 2014. 104 p. (In Russ.).
4. Logston C. F., Jr., Itami G. S. Locomotive friction-creep studies. *ASME J. Eng. Ind.* 1980;(102):275–281.
5. Buscher M. Regulirovanie proskal'zyvaniya koles na elektrovozhakh s asinkhronnym tyagovym privodom [Regulation of wheel slip on electric locomotives with asynchronous traction drive]. *Zheleznye dorogi mira = Rail International (Russian edition)*. 1994;(4):30–45. (In Russ.).
6. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. *Wear*. 2005;(258):992–1000.
7. Polach O. SBB 460 Adhäsionsverhalten, Techn. Report No. 401 [SBB 460 Adhesion Behaviour, Technical Report No. 401]. SLM Winterthur. [S. l.]; 1992.
8. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse [Optimization of modern locomotive bogies through vehicle dynamic system analysis]. *Eisenbahningenieur*. 2002;53(7):50–57.
9. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]. 2nd ed. Moscow: Transport Publ.; 1983. 328 p. (In Russ.).
10. Osintsev I. A., Loginov A. A. Ustroystvo i ekspluatatsiya elektrovoza 2ES10 [Design and operation of an electric locomotive 2ES10]. Moscow: Russian Railways Publ.; 2015. 332 p. (In Russ.).
11. Labview. Rukovodstvo pol'zovatelya [LabView. User manual]. Translated from engl. by V. Nikolaev. Taganrog: TTI YuFU Publ.; 2008. 410 p. (In Russ.).
12. Burchak G. P., Vasil'ev A. P., Lyapushkin N. N., Savos'kin A. N. Model' vzaimodeystviya kolesa i rel'sa s uchetom diskretnogo stroeniya metalla kontaktiruyushchikh tel [Model of wheel and rail interaction taking into account the discrete structure of the metal of contacting bodies]. *Vestnik mashinostroeniya = Instrumentation Herald*. 2019;(2):21–28. (In Russ.).
13. Lyapushkin N. N. Prognozirovaniye stsepnnykh svoystv lokomotivov s razlichnymi tipami tyagovykh elektrodvigatelyey [Prediction of the adhesion properties of locomotives with different types of traction motors]. Dr. of Sci. thesis synopsis: 05.22.07. Moscow; 2013. 46 p. (In Russ.).
14. Shilin N. D., Prokof'ev S. N. Poosnoye pereraspredeleniye sil tyagi dlya elektrovozov s asinkhronnymi tyagovymi elektrodvigatelyami [Redistribution of tractive force per axle for electric locomotives with asynchronous traction motors]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2022;81(2):148–156. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156>. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, elmechtrans@mail.ru), Author ID: 528727, <https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

Никита Дмитриевич ШИЛИН,

младший научный сотрудник, НЦ «Тяга поездов», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1152059, <https://orcid.org/0000-0002-1503-1999>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOS'KIN,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St., elmechtrans@mail.ru), Author ID: 528727, <https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

Nikita D. SHILIN,

Junior Researcher, Train Traction Research Center, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1152059, <https://orcid.org/0000-0002-1503-1999>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН. Формирование и направление исследования, формулировка целей и задач, обозначение алгоритмов исследования (50%).

Никита Дмитриевич ШИЛИН. Обзор основных направлений, описание материалов и методов решения поставленных задач, обработка и анализ результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOS'KIN. Formation and direction of research, formulation of goals and objectives, designation of research algorithms (50%).

Nikita D. SHILIN. Overview of the main directions, description of materials and methods for solving the tasks set, processing and analysis of the results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.04.2022, первая рецензия получена 14.04.2022, вторая рецензия получена 27.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 05.04.2022, first review received 14.04.2022, second review received 27.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
 - Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
 - Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛБРУС
 - Изучение технологии транспортных процессов
 - Транспортная логистика
 - Изучения принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
 - Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
 - Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения
- Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ». Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий. По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца. Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (499) 260-41-08, parkhaev.alexey@vniizht.ru



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 629.4.048

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246

EDN: <https://elibrary.ru/cwxwwz>



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ТЕПЛОВОЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Г. М. Стоякин¹, А. В. Костин², С. Н. Науменко³✉

¹Проектное бюро АПЕКС,
Москва, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

³Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Задачи повышения энергосбережения в системах отопления пассажирских вагонов тепловозной тяги в настоящее время являются весьма актуальными. В качестве альтернативного источника энергии для этих систем проанализирована возможность использования отведенной теплоты дизельного двигателя тепловоза.

Материалы и методы. Произведен анализ источников отходящей теплоты двигателя: охлаждающей воды и выхлопных газов. Разработана принципиальная схема утилизации теплоты выхлопных газов для ее использования в системе отопления пассажирских вагонов. В качестве возможной теплообменной поверхности теплообменника-утилизатора предложены пластинчато-ребристая, змеевиковая и трубная поверхность с продольными турбулизаторами пограничного слоя. Определена требуемая величина этой поверхности для максимальной мощности системы отопления пассажирского поезда.

Результаты. Показана возможность использования теплоты выхлопных газов двигателя в системе отопления 15-вагонного пассажирского поезда без привлечения сторонних источников энергии.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты демонстрируют достаточный потенциал повышения эффективности использования энергии топлива тепловозного двигателя при утилизации его отходящей теплоты для системы отопления пассажирских вагонов. Обоснован подбор теплообменника-утилизатора из расчета производительности в размере 50 % от пиковой нагрузки на систему отопления на средней позиции контроллера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выхлопные газы, система отопления вагона, тепловозный двигатель, теплота, утилизатор

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Стоякин Г. М., Костин А. В., Науменко С. Н. Использование теплоты отработавших газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 240–246. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.048

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246

EDN: <https://elibrary.ru/cwxwwz>



USE OF DIESEL ENGINE EXHAUST GAS HEAT FOR HEATING PASSENGER CARS

Grigoriy M. Stoyakin¹, Alexander V. Kostin², Sergey N. Naumenko³✉

¹Design Bureau APEX,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

³Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The tasks of increasing energy saving in heating systems for passenger cars of diesel trains are currently relevant. As an alternative source of energy for these systems, the possibility of using the waste heat of the diesel locomotive engine is analysed.

Materials and methods. The article provides an analysis of the engine waste heat sources, cooling water and exhaust gases. A schematic diagram of exhaust gas heat exchanger for its use in the heating system of passenger cars has been developed. As a possible heat-exchange surface of the waste heat exchanger, plate-ribbed, coiled and tube surfaces with longitudinal boundary layer turbulators are proposed. The required area of this surface for the maximum power of the heating system for a passenger train is determined.

Results. The article shows the possibility of using engine exhaust heat in the heating system of a 15-car passenger train without involving third-party energy sources.

Discussion and conclusion. The obtained results demonstrate a sufficient potential for increasing the efficiency of using the diesel engine fuel energy when utilising its waste heat for the heating system of passenger cars. The selection of a waste heat exchanger is justified based on a performance of 50% of the peak load on the heating system at the middle position of the controller.

KEYWORDS: exhaust gases, car heating system, diesel locomotive engine, heat, heat exchanger

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. Use of diesel engine exhaust gas heat for heating passenger cars. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):240-246. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246>.

Введение. В настоящее время вопросы экологии и экономичности энергетических систем на железнодорожном транспорте приобретают все большее значение.

В частности, просматривается тенденция постепенного отказа от угольного/дровяного отопления пассажирских вагонов локомотивной тяги и от установки комбинированных электроугольных котлов. Некоторые современные модели вагонов производства АО «ТВЗ» электроугольными котлами не оснащаются, а на многочисленных неэлектрифицированных магистралях ОАО «РЖД» активно рассматривается возможность применения тепловозов, оборудованных отопительным трансформатором, позволяющим осуществлять обогрев от подвагонной магистрали 3 кВ.

Электроотопление (прямое или косвенное) на неэлектрифицированных участках непродуктивно и идет в разрез с тенденциями, характерными для промышленности и энергетики, так как выработка электроэнергии с ее дальнейшим преобразованием в теплоту менее эффективна, чем непосредственное сжигание топлива для получения тепловой энергии. Учитывая, что максимальная электрическая мощность системы отопления пассажирского вагона равна 48 кВт [1], для 15-вагонного пассажирского поезда дополнительная электрическая нагрузка на дизель-генераторную установку тепловоза составит 720 кВт.

Значительно более эффективным можно считать использование для отопления вагонов теплоты, отходящей от дизельного двигателя тепловоза. При этом в качестве источников теплоты предлагается рассматривать выхлопные газы и теплоноситель, охлаждающий двигатель.

Сравнение источников теплоты для применения в системах отопления пассажирских вагонов. Концепция центрального отопления для пассажирского подвижного состава не нова. При паровой тяге центральное (паровое) отопление вагонов являлось стандартным решением (источником пара был или паровоз, или специальный вагон-котельная). В рефрижераторном подвижном составе также применялось распределение холода от одной установки на несколько вагонов с использованием циркулирующего в системе охлаждения хладоносителя [2].

Использование теплоты воды, охлаждающей двигатель, с нашей точки зрения, менее эффективно, чем утилизация тепла выхлопных газов. При непосредственном применении циркулирующего теплоносителя водяной системы тепловоза в системе отопления вагона (открытая система) потребуется установка сложной балансировочной арматуры, что приведет к значительному снижению надежности обеих систем. При установке теплообменника в каждом вагоне (закрытая система) и регулировании температуры по нагреваемой стороне решаются проблемы с гидрав-

лической увязкой, но при этом потребуется большое количество оборудования, что вызовет существенное удорожание системы. Вместе с тем указанные технологии успешно применяются на объектах стационарной энергетики ОАО «РЖД». Например, теплота воды, охлаждающей компрессоры на горочных комплексах, используется для отопления зданий постов электрической централизации [3].

Использование теплоты отработавших газов традиционно для судовых энергетических установок. В последнее время оно получило значительное распространение на применяемых в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве дизель-генераторных, газотурбинных и газопоршневых установках. Это обусловлено постоянным ростом стоимости топлива, а также возможностью при использовании современных технологий разрабатывать достаточно компактные и эффективные теплообменные аппараты.

Развитие систем рекуперации энергии отработавших газов от двигателей, в том числе тепловозов, как правило, разделяют по следующим направлениям:

1. Преобразование тепловой энергии в механическую энергию: двигатель Стирлинга; машины, работающие по циклу Ренкина (паровому или органическому).
2. Преобразование тепловой энергии отработавших газов в электрическую энергию: применение термоэлектрических генераторов.
3. Преобразование кинетической энергии отработавших газов: применение систем турбонаддува; применение силовых турбин; применение электрических машин в системах турбонаддува; применение электрических турбогенераторов.

На основании проведенного в статье [4] анализа применение электрических турбогенераторов в качестве системы эффективного преобразования энергии отработавших газов в электрическую энергию является наиболее приемлемым вариантом, исходя из стоимости, габаритных размеров, удобства компоновки и эффективности.

Вместе с тем авторами предлагается рассмотреть вариант использования тепловой энергии отработавших газов от двигателей тепловоза непосредственно для обогрева пассажирских вагонов.

Железнодорожный транспорт обладает спецификой, не позволяющей напрямую копировать технические решения из других областей промышленности. Однако оснастить дизельный двигатель тепловоза необходимым теплообменным оборудованием (теплообменником-утилизатором) представляется вполне выполнимой задачей. Так, на рис. 1 приведена принципиальная схема использования теплоты уходящих из двигателя выхлопных газов для отопления пассажирских вагонов.

Для реализации предлагаемой схемы требуется размещение теплообменных поверхностей доста-

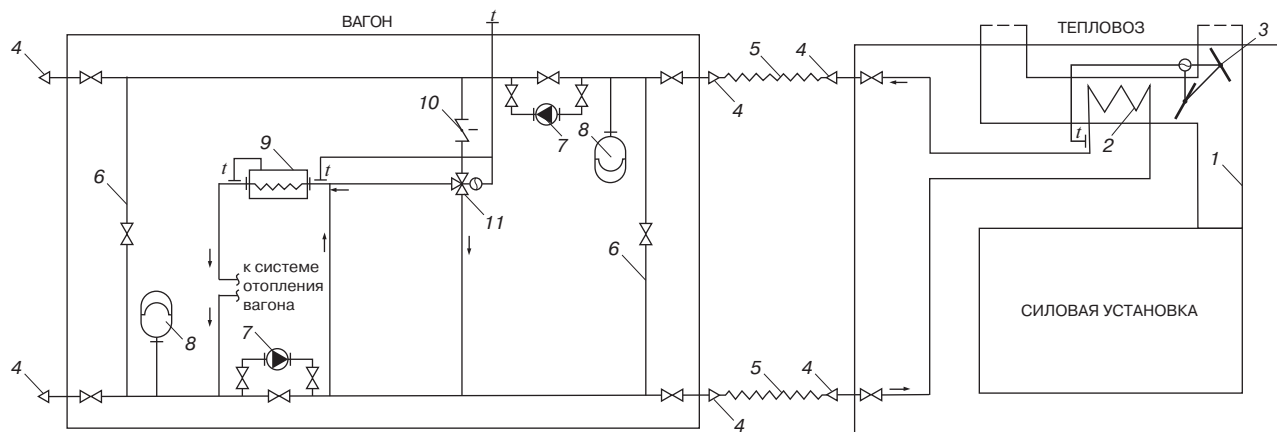


Рис. 1. Принципиальная схема использования теплоты выхлопных газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов:

1 — выхлопной тракт от дизель-генераторной (силовой) установки тепловоза; 2 — теплообменник-утилизатор; 3 — пропорциональные заслонки с сервоприводом в выхлопном тракте; 4 — быстроразъемные соединения с клапаном; 5 — гибкий теплоизолированный трубопровод в защитном рукаве; 6 — аварийный байпас для возможности замкнутой циркуляции при отключении части сети; 7 — циркуляционный насос (с аварийным байпасом); 8 — расширительный бак закрытого типа; 9 — резервный электрический котел; 10 — регулятор расхода прямого действия; 11 — клапан трехходовой с сервоприводом; t — точка замера температуры (линией указан соответствующий исполнительный механизм)

Fig. 1. Schematic diagram of utilisation of the diesel engine exhaust gases heat for heating passenger cars:

1 — exhaust tract from the diesel generator (power plant) of the diesel locomotive; 2 — waste heat exchanger; 3 — proportional flaps with a servomotor in the exhaust tract; 4 — quickly detachable connections with a valve; 5 — flexible heat-insulated pipeline in a protective sleeve; 6 — emergency bypass for the possibility of closed circulation when part of the network is turned off; 7 — circulation pump (with an emergency bypass); 8 — expansion tank of a closed type; 9 — backup electric boiler; 10 — direct action flow regulator; 11 — three-way valve with a servo drive; t — temperature measurement point (the line indicates the corresponding executive mechanism)

точной площади в выхлопном тракте двигателя параллельно или последовательно глушителю шума дизеля или непосредственно в глушителе (так называемый шумоглушитель-утилизатор) [5, 6, 7]. Понятно, что выбор наиболее рационального размещения утилизатора требует выполнения опытно-конструкторских работ при разработке новых модификаций локомотивов, оснащенных предлагаемой авторами системой.

Оценка требуемой теплообменной поверхности утилизатора. Параметры и конструкция теплообменника-утилизатора должны соответствовать массогабаритным требованиям для конкретного тепловоза; обладать аэродинамическим сопротивлением, допустимым с точки зрения проектных режимов работы дизельного двигателя. В наибольшей степени этим требованиям отвечают пластинчатые теплообменные конструкции, пучки поперечно-обтекаемых трубок с продольным турбулизатором гидродинамического пограничного слоя [8], а в случае утилизатора, встраиваемого в глушитель, — трубные змеевики [9].

Определение требуемой теплообменной поверхности утилизатора (m^2) произведем для указанной тепловой мощности системы отопления 15-вагонного пассажирского поезда $Q = 720$ кВт из известного уравнения теплопередачи [10]:

$$F = \frac{Q \cdot 10^3}{K \eta \Delta t}, \quad (1)$$

где K — коэффициент теплопередачи, Вт/($m^2 \cdot K$); $\eta = 0,8$ — коэффициент, учитывающий загрязнение теплообменной поверхности; Δt — средний логарифмический напор между теплоносителями, $^{\circ}C$.

$$\overline{\Delta t} = \frac{(t'_r - t''_b) - (t''_r - t'_b)}{\ln \frac{(t'_r - t''_b)}{(t''_r - t'_b)}}, \quad (2)$$

где t'_r и t''_r — соответственно температура выхлопных газов на входе и выходе из утилизатора, K ; t'_b и t''_b — соответственно температура воды на входе и выходе из утилизатора, $^{\circ}C$.

Рассмотрим возможность использования в качестве утилизатора пластинчатого теплообменника типа ТПР несимметричной компоновки с поверхностью одной пластины $f = 0,3 m^2$ и эквивалентным диаметром канала $d = 0,008$ м. Пластины изготовлены из нержавеющей стали AISI 316 толщиной 0,5 мм. Ввиду ограниченного гидравлического сопротивления, необходимости минимизации аэродинамических шумов скорость газов в утилизаторе должна составлять 15–20 м/с. При более высоких скоростях существенное влияние может

оказывать сжимаемость газа, при более низких скоростях значительно снижается теплообмен. Скорость воды рекомендуется принимать в диапазоне 1–3 м/с из условия турбулентности режима течения теплоносителя и по экономическим соображениям [11]. В расчете примем скорость газов $w_r = 20$ м/с и скорость воды $w_b = 1,0$ м/с.

Температурные графики для теплоносителей в утилизаторе принимаем: по воде системы отопления 90/50 °С, по выхлопным газам 550/150 °С, учитывая рекомендации [12], в соответствии с которыми температура выхлопных газов для дизельных двигателей не должна опускаться ниже 150–180 °С во избежание загрязнения или образования конденсата внутри теплообменника. Коэффициент теплопередачи рассчитывается по уравнению

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r} + \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{1}{\alpha_b}}, \quad (3)$$

где $\delta_{пл}$ — толщина пластины, м; $\lambda_{пл}$ — коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К); α_r и α_b — соответственно коэффициенты теплоотдачи от газов к поверхности пластины и от поверхности пластины к воде, Вт/(м²·К).

Коэффициенты теплоотдачи α при движении обоих теплоносителей в каналах, образованных гофрированными пластинами, определяются из критериального уравнения

$$Nu = 0,135 Re^{0,73} Pr^{0,43} (Pr / Pr_{ст})^{0,25}, \quad (4)$$

где $Nu = \alpha d / \lambda$ — критерий Нуссельта; λ — коэффициент теплопроводности соответствующего теплоносителя, Вт/(м·К); $Re = wd / \nu$ — критерий

Рейнольдса; w — скорость движения теплоносителя в канале, м/с; ν — коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м²/с; Pr — критерий Прандтля для соответствующего теплоносителя при его средней температуре в теплообменнике; $Pr_{ст}$ — критерий Прандтля для соответствующего теплоносителя при температуре стенки теплообменника.

Результаты теплового расчета утилизатора представлены в таблице.

Для предлагаемых других конструкций теплообменных поверхностей утилизатора при указанной дополнительной нагрузке на дизель-генераторную установку тепловоза можно ориентироваться на площадь этой поверхности 20–25 м².

Тепловую мощность, которую может отвести утилизатор от выхлопных газов, оценим на примере дизельного двигателя тепловоза ТЭП-70БС. Расчет проведем для номинальной мощности двигателя $N = 2964$ кВт из соотношения

$$Q_y = N q_r \frac{t'_r - t''_r}{t'_r} = 2964 \cdot 0,35 \cdot \frac{550 - 150}{550} = 754 \text{ кВт}, \quad (5)$$

где $q_r = 0,35$ — доля теплоты, отведенная с выхлопными газами [13, 14].

Полученная тепловая мощность больше требуемой мощности системы отопления (720 кВт).

Вместе с тем в большинстве регионов страны, как видно из рис. 2 и 3, значительную часть года для поддержания комфортных параметров микроклимата в вагоне необходим обогрев его помещений [15]. При этом эксплуатация подвижного состава предусматривается при температурах до минус 40 °С. Таким образом, система отопления подвижного состава в

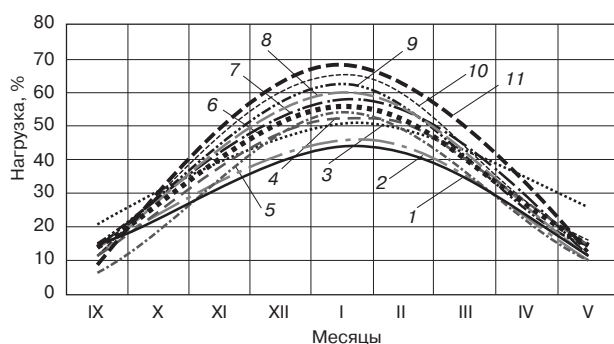


Рис. 2. Распределение средней относительной отопительной нагрузки по месяцам:

1 — Санкт-Петербург; 2 — Москва; 3 — Мурманск; 4 — Красноярск; 5 — Омск; 6 — средняя; 7 — Челябинск; 8 — Казань; 9 — Владивосток; 10 — Иркутск; 11 — Хабаровск

Fig. 2. Distribution of the average relative heating load by months:

1 — St. Petersburg; 2 — Moscow; 3 — Murmansk; 4 — Krasnoyarsk; 5 — Omsk; 6 — average; 7 — Chelyabinsk; 8 — Kazan; 9 — Vladivostok; 10 — Irkutsk; 11 — Khabarovsk

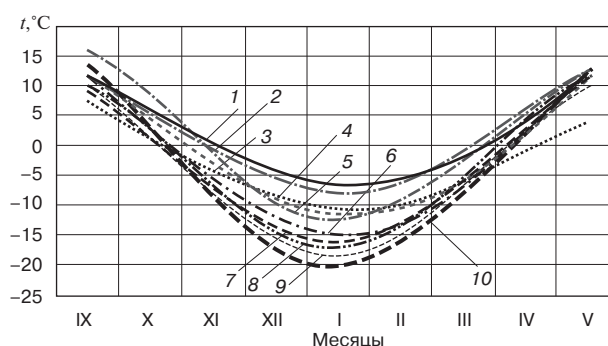


Рис. 3. Распределение средних температур по месяцам:

1 — Санкт-Петербург; 2 — Москва; 3 — Мурманск; 4 — Красноярск; 5 — Омск; 6 — Челябинск; 7 — Казань; 8 — Владивосток; 9 — Иркутск; 10 — Хабаровск

Fig. 3. Distribution of average temperatures by months:

1 — St. Petersburg; 2 — Moscow; 3 — Murmansk; 4 — Krasnoyarsk; 5 — Omsk; 6 — Chelyabinsk; 7 — Kazan; 8 — Vladivostok; 9 — Irkutsk; 10 — Khabarovsk

Таблица

Результаты теплового расчета пластинчатого теплообменника-утилизатора

Table

The results of the thermal calculation of the plate waste heat exchanger

Параметры	Выхлопные газы	Вода
Средняя температура, °C	350	70
Средний логарифмический температурный напор $\overline{\Delta t}$, °C	240	
Критерий Рейнольдса Re	2885	19 280
Критерий Нуссельта Nu	38,3	299
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	235	24 910
Коэффициент теплопередачи K, Вт/(м ² ·К)	232	
Теплообменная поверхность, м ²	16,2	

большинстве регионов эксплуатации поезда значительную часть времени нагружена в среднем не более чем на 56 %. В качестве характерного показателя авто-рами выбрана нагрузка при усредненной температуре окружающей среды, так как она лучше отражает тенденции расхода теплоты, чем нагрузка при температуре по параметрам Б, принимаемой в качестве расчетной из условия гарантированного поддержания параметров системы отопления.

Обсуждение и заключение. Проведенные расчеты показали, что утилизатор позволяет отвести от выхлопных газов тепловую мощность, достаточную для нагрева воды в системе отопления 15-вагонного пассажирского поезда. Следует отметить, что расчеты проводились для максимальной мощности системы отопления поезда.

Поскольку целью инноваций является сокращение расхода энергоресурсов и нагрузки на экологию, а сам предлагаемый вариант теплообменника-утилизатора интегрируется в существующие схемные решения системы отопления, рассчитывать его на предельные нагрузки нецелесообразно. С учетом изложенного авторы считают обоснованным подбор теплообменника-утилизатора из расчета производительности в размере 50 % от пиковой нагрузки на систему отопления на средней позиции контроллера. Более точные значения могут быть приняты на основании технико-экономического расчета в рамках реализации опытно-конструкторской работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жариков В. А. Климатические системы пассажирских вагонов. М.: Трансинформ, 2006. 135 с.
2. Хладотранспорт и основы теплотехники: монография / Ю. И. Матяш [и др.]. М., 2019. 360 с. EDN: <https://elibrary.ru/ntvner>.
3. Перспективы использования тепловых насосов на горочных комплексах железных дорог / С. Н. Наumenko [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2012. № 4. С. 25–29. EDN: <https://elibrary.ru/pbeuln>.
4. Хрипач Н. А., Татарников А. П. Анализ систем преобразования энергии отработавших газов для когенерационных уста-

новок [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10134> (дата обращения: 01.07.2022).

5. Системы утилизации тепла [Электронный ресурс] // ООО «ТМ МАШ»: [сайт]. URL: <https://tmmash.ru/oborudovanie/sistemy-utilizacii-tepla> (дата обращения: 01.07.2022).

6. Патент № 123905 Российская Федерация, МПК F22B 1/18. Котел-утилизатор тепла выхлопных газов: № 2012131678/06: заявл. 24.07.12: опубл. 10.01.13 / Годик И. Л.; заявитель и патенто-обладатель ЗАО «Ролт Инжиниринг». 15 с.

7. Авторское свидетельство СССР № 1739064. Котел-утилизатор тепла выхлопных газов: № 4832593/06: заявл. 30.05.90: опубл. 07.06.92 / Скоп Е. А. [и др.].

8. Минаев Б. Н., Костин А. В., Стоякин Г. М. О влиянии искусственной турбулизации пограничного слоя на гидравлическое сопротивление пучка круглых труб, омываемых поперечным потоком вязкой среды // Наука и техника транспорта. 2012. № 2. С. 47–52.

9. Теплообменные аппараты: учеб. пособие / Б. Е. Байгалиев [и др.]. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. 180 с.

10. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.

11. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 1973. 750 с.

12. Что представляет собой теплообменник отходящих газов [Электронный ресурс] // BOWMAN: [сайт]. URL: <https://ej-bowman.com/ru> (дата обращения: 30.06.2022).

13. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский [и др.]; под ред. Н. А. Фуфрянского, А. Н. Бевзенко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1988. 343 с.

14. Болдырев О. Н. Судовые энергетические установки. Дизельные и газотурбинные установки. Северодвинск: Севмашвтуз, 2003. 171 с.

15. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (актуализированная версия СНиП 23-01-99*) [Электронный ресурс]: введен в действие 25 июня 2021 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 30.06.2022).

REFERENCES

1. Zhariikov V. A. Klimaticheskie sistemy passazhirskikh vagonov [Climatic systems of passenger cars]. Moscow: Transinform Publ.; 2006. 135 p. (In Russ.).
2. Matyash Yu. I., Klyuka V. P., Voron O. A., Naumenko S. N. Khladotransport i osnovy teplotekhniki [Refrigerator transport and fundamentals of heat engineering]. Moscow; 2019. EDN: <https://elibrary.ru/ntvner>. (In Russ.).
3. Naumenko S. N., Minaev B. N., Filippov M. D., Kostin N. M. Perspektivy ispol'zovaniya teplovykh nasosov na gorochnykh kompleksakh

zheleznykh dorog [Prospects for the use of heat pumps at railway hump complexes]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science*. 2012;(4):25-29. EDN: <https://elibrary.ru/pbeuln>. (In Russ.).

4. Khripach N. A., Tatarnikov A. P. Analiz sistem preobrazovaniya energii otrabotavshikh gazov dlya kogeneratsionnykh ustanovok [Analysis of exhaust gas energy conversion systems for cogeneration plants]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2013;(5). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10134> (access date: 01.07.2022). (In Russ.).

5. Sistemy utilizatsii tepla [Heat recovery systems]. TM MASH: [website]. URL: <https://tmmash.ru/oborudovanie/sistemy-utilizatsii-tepla> (access date: 01.07.2022). (In Russ.).

6. Godik I. L. Patent No. 123905 Russian Federation, MPK F22B 1/18. Kotel-utilizator tepla vykhlopnykh gazov [Exhaust heat recovery boiler]: No. 2012131678/06: appl. 24.07.12: publ. 10.01.13. 15 p. (In Russ.).

7. Skop E. A., Terekhov A. L., Red'ko A. F., Yutina A. S. USSR author's certificate No. 1739064. Kotel-utilizator tepla vykhlopnykh gazov [Exhaust heat recovery boiler]: No. 4832593/06: appl. 30.05.90: publ. 07.06.92. (In Russ.).

8. Minaev B. N., Kostin A. V., Stoyakin G. M. O vliyaniy iskusstvennoy turbulizatsii pogranichnogo sloya na gidravlichesкое soprotivleniye puchka kruglykh trub, omyvaemykh poperechnym potokom vyazkoy sredy [On the effect of artificial turbulence of the boundary layer on the hydraulic resistance of a bundle of round pipes washed by a transverse flow of a viscous medium]. *Nauka i tekhnika transporta = Science and Technology in Transport*. 2012;(2):47-52. (In Russ.).

9. Baygaliev B. E., Shchelchikov A. V., Yakovlev A. B., Gortyshev P. Yu. Teploobmennye apparaty (ucheb. posobiye) [Heat exchangers (textbook)]. Kazan: Kazan. St. Eng. Univ. Publ.; 2012. 180 p. (In Russ.).

10. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha [Heat Transfer]. Moscow: Energiya Publ.; 1975. 488 p. (In Russ.).

11. Kasatkin A. G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. 9th ed. Moscow: Khimiya Publ.; 1973. 750 p. (In Russ.).

12. Chto predstavlyayet soboy teploobmennik otkhodyashchikh gazov [What is an exhaust gas heat exchanger]. BOWMAN: [website]. URL: <https://ej-bowman.com/ru> (access date: 30.06.2022). (In Russ.).

13. Fufryanskiy N. A., Dolganov A. N., Nestrakhov A. S., et al. Razvitiye lokomotivnoy tyagi [Development of locomotive traction]. 2nd ed. Moscow: Transport Publ.; 1988. 343 p. (In Russ.).

14. Boldyrev O. N. Sudovye energeticheskie ustanovki. Dizel'nye i gazoturbinnnye ustanovki [Ship power plants. Diesel and gas turbine plants]. Severodvinsk: Sevmashvuz Publ.; 2003. 171 p. (In Russ.).

15. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya (aktualizirovannaya versiya SNIp 23-01-99*) [Building climatology (updated version of SNIp 23-01-99*)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (access date: 30.06.2022). (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорий Михайлович СТОЯКИН,

ведущий инженер по отоплению, вентиляции и кондиционированию, Проектное бюро АПЕКС (115114, г. Москва, бизнес-квартал «Новоспаский», Дербеневская наб., д. 7, стр. 9), Author ID: 1107437, <https://orcid.org/0000-0002-2439-2315>

Александр Владимирович КОСТИН,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), Author ID: 692501, <https://orcid.org/0000-0001-8965-9343>

Сергей Николаевич НАУМЕНКО,

д-р техн. наук, ученый секретарь, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626,

г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoriy M. STOYAKIN,

Leading Engineer for Heating, Ventilation and Air Conditioning, Design Bureau APEX (115114, Moscow, 7, bldg. 9, Dербеневская naberezhnaya, Novospassky business quarter), Author ID: 1107437, <https://orcid.org/0000-0002-2439-2315>

Alexander V. KOSTIN,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Thermal Power Engineering of Railway Transport, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 692501, <https://orcid.org/0000-0001-8965-9343>

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. of Sci. (Engineering), Scientific Secretary, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

ВКЛАД АВТОРОВ

Григорий Михайлович СТОЯКИН. Обзор основных направлений исследования. Разработка принципиальной схемы системы отопления пассажирского вагона, формирование выводов и предложений (40%).

Александр Владимирович КОСТИН. Обоснование и структурирование методики расчета утилизатора. Сбор и структурирование материалов, патентный поиск. Обработка результатов расчета (30%).

Сергей Николаевич НАУМЕНКО. Формирование направлений исследования, формулировка цели и задач (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Grigoriy M. STOYAKIN. Review of the main directions of research. Development of a schematic diagram of the heating system for a passenger car, drawing of conclusions and suggesting proposals (40%).

Alexander V. KOSTIN. Substantiation and structuring of the methodology for calculating the heat recovery unit. Collection and structuring of materials, patent search. Processing of calculation results (30%).

Sergey N. NAUMENKO. Formation of the direction of research, formulation of goals and objectives (30%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

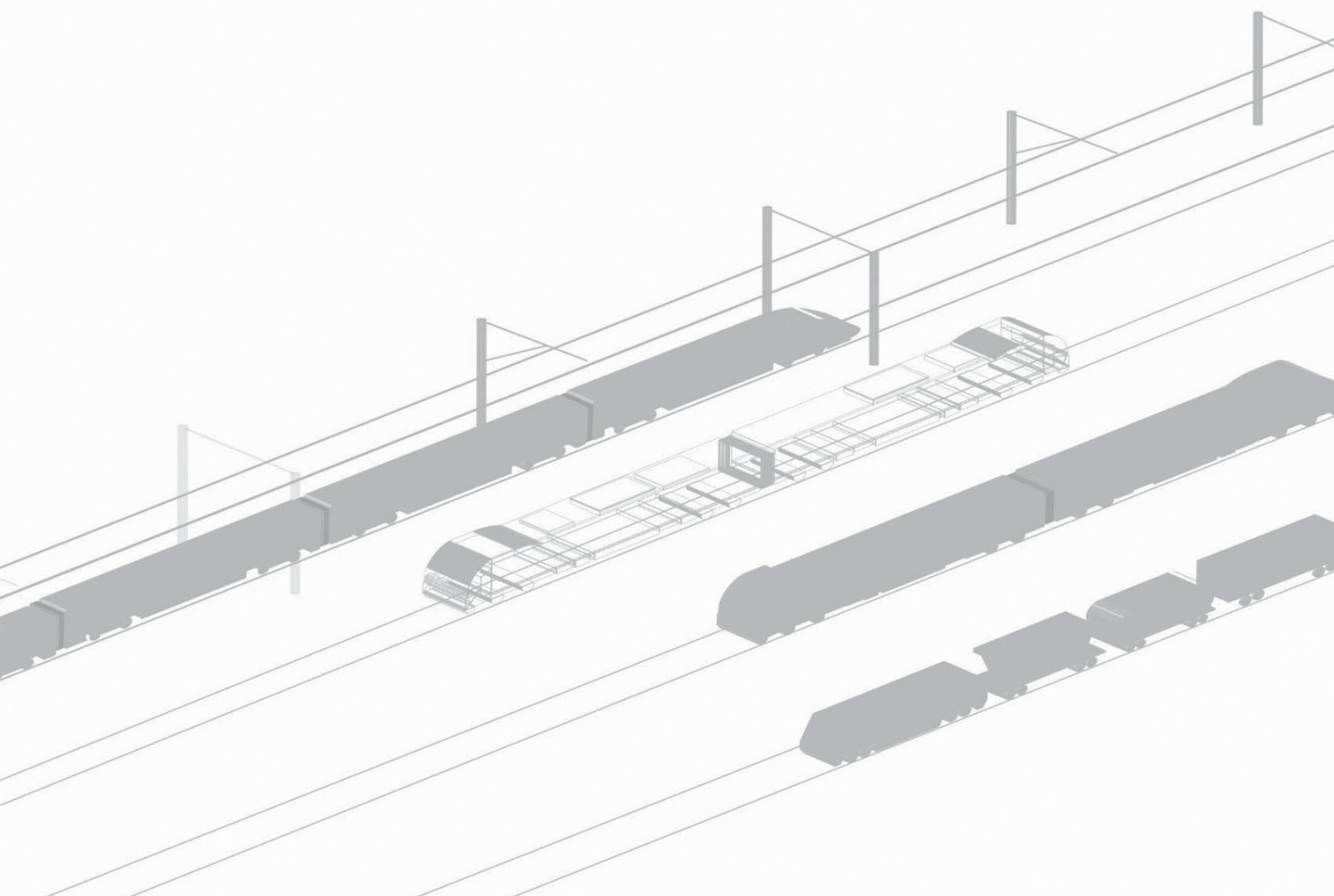
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.07.2022, первая рецензия получена 06.07.2022, вторая рецензия получена 08.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 04.07.2022, first review received 06.07.2022, second review received 08.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ





АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 621.331:625.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257

EDN: <https://elibrary.ru/emrxle>



ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Н. П. Григорьев¹, И. В. Игнатенко¹, С. А. Власенко¹,
В. А. Ковалев¹✉, В. В. Шаталов²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
Хабаровск, Российская Федерация

²Трансэлектропроект,
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — разработка мероприятий, определенных стратегическими программами развития железнодорожного транспорта России на основе анализа схем питания тяговой сети Дальневосточной железной дороги — филиала ОАО «РЖД».

Материалы и методы. Оценка работоспособности системы тягового электроснабжения получена на основе анализа реальных показателей функционирования участка Дальневосточной железной дороги, положений теорий электротехники и электроснабжения системы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ.

Результаты. На основе анализа совместной работы систем внешнего и тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги были определены четыре тяговые подстанции с низкими технико-экономическими показателями. Участки сети, которые питают подстанции, являются узким местом в системе тягового электроснабжения. Повышение работоспособности предложено выполнить переходом присоединения обмоток трансформаторов тяговых подстанций к системам внешнего и тягового электроснабжения по типовой схеме «звезда — треугольник». Такое присоединение обеспечит повышение скорости движения поездов, снижение интервалов попутного следования поездов и потерь электрической энергии, повышение качества электрической энергии в системе внешнего электроснабжения и электрических сетях Дальневосточной дирекции по энергообеспечению (структурное подразделение Трансэнерго — филиала ОАО «РЖД»).

Обсуждение и заключение. Нормализация подключения четырех тяговых подстанций по схеме «подпитывающих» обеспечивается изменением фазировки таким образом, что питание двух плеч одной обмотки силового трансформатора переводится на две обмотки. Выравнивание модулей токов в обмотках трансформаторов тяговых подстанций позволяет снизить падение напряжения в наиболее нагруженной фазе и, соответственно, повысить напряжение в тяговой сети, что обеспечивает повышение скорости движения поездов и снижение интервалов попутного следования. Перевод питания плеч с одной обмотки трансформатора на две снижает потери электрической энергии в силовых трансформаторах и системе внешнего электроснабжения. Снижение несимметрии токов в обмотках силового трансформатора повышает качество электрической энергии в системе внешнего и районного электроснабжения. Повышение срока службы силового трансформатора обеспечивается снижением интенсивности термического износа изоляции наиболее нагруженной обмотки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железная дорога, система внешнего электроснабжения, система тягового электроснабжения, тяговые подстанции, потери электроэнергии, несимметрия напряжения, входные сопротивления, нормальные схемы питания тяговых нагрузок

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Григорьев Н. П., Игнатенко И. В., Власенко С. А., Ковалев В. А., Шаталов В. В. Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 248–257. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257>.

✉ kovalevv.a.2011@mail.ru (В. А. Ковалев)

© Григорьев Н. П., Игнатенко И. В., Власенко С. А.,
Ковалев В. А., Шаталов В. В., 2022



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.331:625.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257

EDN: <https://elibrary.ru/emrxle>



INCREASING THE PERFORMANCE OF THE FAR EASTERN RAILWAY TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM

Nikolay P. Grigor'ev¹, Ivan V. Ignatenko¹, Sergey A. Vlasenko¹,
Vladimir A. Kovalev¹✉, Vladimir V. Shatalov²

¹Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russian Federation

²Transelektroproyekt,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study is to develop measures determined by the strategic programmes for the development of Russian railway transport based on the analysis of power supply schemes for the traction network of the Far Eastern Railway, a branch of Russian Railways.

Materials and methods. Evaluation of the performance of the traction power supply system was made based on the analysis of the actual performance of the Far Eastern Railway section, as well as the theories of electrical engineering and power supply of the 25 kV AC electrified railway system.

Results. Based on the analysis of the joint operation of the external and traction power supply systems of the Far Eastern Railway, four traction substations with low technical and economic indicators were identified. Network sections that feed the substations are a bottleneck in the traction power supply system. It is proposed to increase the efficiency by switching the connection of the windings of transformers of traction substations to the systems of external and traction power supply according to the typical star – delta scheme. Such a connection will ensure an increase in the speed of trains, a reduction in train succession time and losses of electricity, an increase in the quality of electric energy in the external power supply system and electric networks of the Far Eastern Directorate for Energy Supply (a structural subdivision of Transenergo, a branch of Russian Railways).

Discussion and conclusion. Normalisation of the connection of four traction substations according to the feeding scheme is ensured by changing the phasing in such a way that the power supply of the two legs of one winding of the power transformer is transferred to two windings. Alignment of the current modules in the windings of transformers of traction substations makes it possible to reduce the voltage drop in the most loaded phase and, accordingly, increase the voltage in the traction network, which ensures an increase in the speed of trains and a reduction in passing intervals. Switching the power supply of the arms from one winding of the transformer to two reduces the loss of electrical energy in power transformers and the external power supply system. Reducing the current unbalance in the windings of the power transformer improves the quality of electrical energy in the system of external and district power supply. An increase in the service life of the power transformer is ensured by a decrease in the intensity of thermal wear of the insulation of the most loaded winding.

KEYWORDS: railway, external power supply system, traction power supply system, traction substations, power losses, voltage unbalance, input resistances, normal power supply circuits for traction loads

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Kovalev V. A., Shatalov V. V. Increasing the performance of the Far Eastern Railway traction power supply system. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):248-257. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-248-257>.

✉ kovalev.v.a.2011@mail.ru (V. A. Kovalev)

© Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Vlasenko S. A.,
Kovalev V. A., Shatalov V. V., 2022

Введение. Дальневосточная железная дорога (ДВЖД) расположена в границах Дальневосточного федерального округа. Основной объем перевозок грузов и пассажиров на ДВЖД выполняется электроподвижным составом (ЭПС). Стратегические программы развития железнодорожного транспорта Российской Федерации [1–4] предусматривают:

1. Разработку и внедрение технических средств и технологий организации высокоскоростного и скоростного пассажирского движения, тяжеловесного движения в грузовом сообщении при обеспечении оптимального взаимодействия подвижного состава и элементов инфраструктуры.

2. Увеличение провозной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей до 180 млн т к 2024 г. за счет повышения скорости движения, весовых норм составов, а также сокращения межпоездных интервалов.

3. Полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, а также и снижение его энергоемкости.

4. Продление срока эксплуатации дорогостоящего оборудования.

Система тягового электроснабжения (СТЭ) ДВЖД получает электрическую энергию (ЭЭ) по схеме однофазного переменного тока напряжением 25 кВ от системы внешнего электроснабжения (СВЭ). СТЭ ДВЖД обеспечивает обращение тяжеловесных поездов массой более 10 тыс. т. В последние два года за счет внедрения новых технологий регулирования движения проходят опытные испытания пропуска поездов массой 13,4 тыс. т. Переработка ЭЭ выполняется на 31 тяговой подстанции (ТП), подключенных к линиям электропередачи (ЛЭП) СВЭ классов напряжения 110 или 220 кВ.

Нормализация схем питания тяговых нагрузок. Повышение объема грузоперевозок в работе [5] предложено выполнить переходом от реактивного регулирования напряжения в тяговой сети к интервальному встречному в СТЭ. Повышение энергоэффективности электроснабжения ЭПС при интервальном встречном регулировании выполняется выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок на прогнозные интервалы расчетного периода. Кафедрой «Системы электроснабжения» ДВГУПС в целях повышения работоспособности СТЭ разработаны нормальные схемы питания тяговых нагрузок, которые являются перспективными, определяются на основе цифровых технологий на интервалы расчетного периода, выбираются по прогнозным показателям функционирования СВЭ и СТЭ и соответствуют следующим формам в интервалах:

1. Первая форма гарантирует напряжение в тяговой сети для выполнения графика движения поездов.

2. Вторая форма обеспечивает соответствие первой форме нормальной схемы питания тяговых нагрузок и минимизирует потери ЭЭ в СТЭ и СВЭ.

3. Третья форма обеспечивает соответствие первой и второй формам нормальных схем питания тяговых нагрузок и рациональное применение ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения.

Нормальные схемы питания тяговых нагрузок выполняются на прогнозные интервалы времени расчетного периода выбором следующих параметров СТЭ:

1. Ступени устройства регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов ТП.

2. Количества силовых трансформаторов ТП в работе.

3. Ступеней устройств продольной и поперечной емкостной компенсации.

4. Схемы питания тяговой сети и др.

Нормализация схемы питания тяговых нагрузок предусматривает приведение в соответствие схем коммутации таким образом, чтобы технико-экономические показатели функционирования СТЭ в прогнозных интервалах времени соответствовали критерию «норма».

Анализ схем присоединения ТП. На рис. 1 представлена схема подключения тяговых подстанций ТП 15–ТП 22 участка СТЭ к ЛЭП СВЭ и тяговой контактной сети. В настоящее время СТЭ ДВЖД содержит подстанции ТП 16, ТП 18, ТП 21 и ТП*, подключенные к тяговой сети по схеме «подпитывающих», которая не соответствует типовым схемам, эксплуатируемым на железных дорогах, электрифицированных по системе однофазного переменного тока напряжением 25 кВ [6, 7]. Подстанция ТП* находится на стадии ввода в эксплуатацию.

Более двух десятилетий назад электрификация участка была выполнена с расстояниями повышенной длины между подстанциями. В целях повышения напряжения в тяговой сети принято решение о строительстве дополнительных ТП, подключенных к тяговой сети по схеме «подпитывающих». Такой подход исключил необходимость применения нейтральных вставок в сечениях контактной сети подключения «подпитывающих» подстанций и изменения фазировки ранее построенных подстанций. Длины межподстанционных зон (МПЗ) участка СТЭ ДВЖД ТП 15–ТП 22 при наличии и отсутствии «подпитывающих» подстанций приведены в табл. 1.

При отсутствии «подпитывающих» подстанций протяженность МПЗ рассматриваемого участка составляла от 76 до 95,7 км и ограничивала пропускную способность ДВЖД вследствие высоких потерь напряжения в контактной сети. Задача снижения протяженности МПЗ решена строительством дополнительных,

не типовых ТП. В 2001 г. введена в эксплуатацию подстанция ТП 21, в 2002 г. выполнен ввод в эксплуатацию ТП 18, в 2003 г. — ТП 16.

Показатели участка СТЭ ДВЖД. Подстанции участка ТП 15–ТП 22 подключены к ЛЭП СВЭ классов напряжения 110 или 220 кВ. Значения модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения ТП 15–ТП 22 к ЛЭП СВЭ, приведенные к тяговому напряжению, представлены в табл. 2.

Значения входных сопротивлений определены матричным методом [8] с учетом действительных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД. Входные и взаимные сопротивления узлов подключения ТП 15–ТП 22 к СВЭ существенно разнятся, оказывают влияние на модули и аргументы напряжения на вводах ТП и создают значительные потери ЭЭ от уравнильных токов [9].

Анализ работоспособности силовых трансформаторов. Под работоспособностью понимается значение всех параметров, характеризующих готовность выполнять заданные функции, а также соответствие требованиям нормативно-технической и конструкторской документации.

Рассмотрим показатели работы одной из ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», на примере ТП 21. На подстанции установлен силовой трансформатор, предназначенный для питания однофазных тяговых нагрузок (тяговый трансформатор), типа ТДТНЖУ-40000/110-У1.

Обмотка высшего напряжения (ВН) АХ тягового трансформатора подключена к фазе В, обмотка ВУ — к фазе А, обмотка СЗ — к фазе С ЛЭП СВЭ. Обмотка тягового напряжения ах подключена началом (ввод а) к контактной сети. Конец обмотки ах подключен к рельсу. Таким образом, напряжение $\dot{U}_B$ питает левое и правое плечо ТП 21. Токи обмоток ВН АХ, ВУ и СЗ существующей схемы подключения ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, определяются по формулам

$$\dot{I}_{AX21} = \frac{2}{3} I_{Л21} e^{i(240-\varphi_{Л21})} + \frac{2}{3} I_{П21} e^{i(240-\varphi_{П21})}; \quad (1)$$

$$\dot{I}_{BY21} = \dot{I}_{CZ21} = -\frac{1}{3} I_{Л21} e^{i(240-\varphi_{Л21})} - \frac{1}{3} I_{П21} e^{i(240-\varphi_{П21})}, \quad (2)$$

где $I_{Л21}$, $I_{П21}$ — модули токов левого и правого плеча ТП 21, А; $\varphi_{Л21}$, $\varphi_{П21}$ — аргументы токов левого и правого плеча ТП 21, град. эл.

Значения модулей и аргументов токов плеч зависят от режима ведения и количества ЭПС в пределах МПЗ. Примем характерные для перспективного движения ЭПС токи левого и правого плеча ТП 21 $\dot{I}_{Л21} = \dot{I}_{П21} = 500 e^{i(-32)}$ А. Токи обмоток ВН ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, составляют

Таблица 1

Протяженность МПЗ участка СТЭ ДВЖД ТП 15–ТП 22

Table 1

The length of the inter-substation zones of the traction power supply system section of the Far Eastern Railway traction substation 15–traction substation 22

Протяженность МПЗ без «подпитывающих» подстанций		Протяженность МПЗ с «подпитывающими» подстанциями	
МПЗ	Протяженность, км	МПЗ	Протяженность, км
ТП 15–ТП 17	89,4	ТП 15–ТП 16	52,8
		ТП 16–ТП 17	36,6
ТП 17–ТП 19	76	ТП 17–ТП 18	27,6
		ТП 18–ТП 19	48,4
ТП 19–ТП 20	95,7	ТП 19–ТП*	50,5
		ТП*–ТП 20	45,2
ТП 20–ТП 22	76,6	ТП 20–ТП 21	30,1
		ТП 21–ТП 22	46,5

Таблица 2

Входные сопротивления узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ

Table 2

Input impedances of the traction substation connection points to power lines of the external power supply system

Номер подстанции	Модуль, Ом	Аргумент, град. эл.
ТП 15	0,65	79,9
ТП 16	0,51	62
ТП 17	0,56	76,2
ТП 18	3,1	83,2
ТП 19	0,56	71,5
ТП *	1,2	75,9
ТП 20	1,3	76,8
ТП 21	2,35	80
ТП 22	4,2	70

$$\dot{I}_{AX21} = 667 e^{i(-152)} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BY21} = \dot{I}_{CZ21} = 334 e^{i28} \text{ А}.$$

Модуль тока обмотки АХ тягового трансформатора в 2 раза превышает модуль тока обмоток ВУ и СЗ, что обуславливает ее повышенный нагрев и увеличивает интенсивность термического износа изоляции [10]. В работе [11] доказано, что потери в меди тягового трансформатора при подключении ТП по схеме «подпитывающей» на 50 % выше, чем при типовой схеме.

Значение коэффициента несимметрии токов обмоток тягового трансформатора ТП 21 (α_I) высокое и

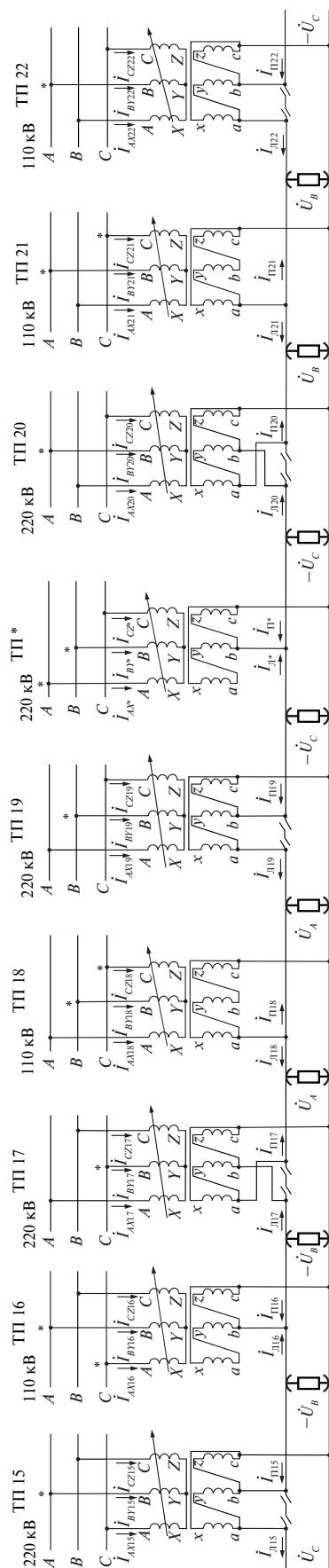


Рис. 1. Существующая схема фазировки участка СТЭ ДВЖД ТП 15 – ТП 22

Fig. 1. The existing phasing scheme for a section of the Far Eastern Railway traction power supply system traction substation 15 – traction substation 22

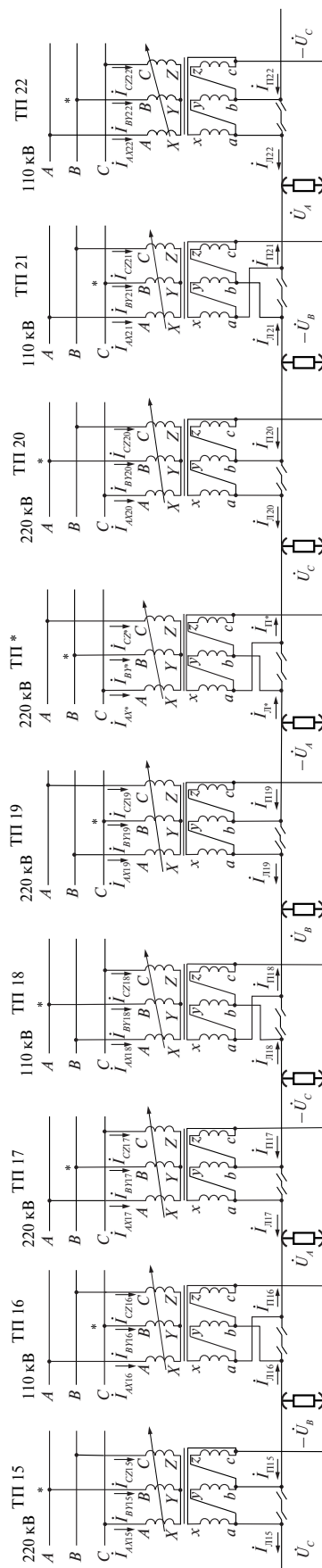


Рис. 2. Предлагаемая схема фазировки участка СТЭ ДВЖД ТП 15 – ТП 22

Fig. 2. The proposed phasing scheme for a section of the Far Eastern Railway traction power supply system traction substation 15 – traction substation 22

составляет 1 [12, 13]. Таким образом, принятая схема подключения ТП 21 приводит к высокой несимметрии токов обмоток трансформатора и фаз ЛЭП СВЭ от токов плеч. Несимметричная нагрузка фаз ЛЭП СВЭ от тяговых нагрузок повышает несимметрию напряжений [14] и снижает показатели качества ЭЭ [15] в СВЭ.

Несимметрия напряжений от тяговых нагрузок в СВЭ. Высоконесимметричные токи обмоток «подпитывающих» подстанций создают несимметричные падения напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ. Несимметричные падения напряжения повышают несимметрию напряжений в узлах СВЭ и у потребителей, подключенных к обмоткам районного напряжения тяговых трансформаторов.

Определим падения напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения обмоток ВН трансформатора ТП 21 к фазам ЛЭП СВЭ. Ток $\dot{I}_{AX21}$ создает падение напряжения на входном сопротивлении узла подключения обмотки АХ к фазе В ($\Delta\dot{U}_{B21}$), ток $\dot{I}_{BY21}$ — обмотки ВУ к фазе А ($\Delta\dot{U}_{A21}$), ток $\dot{I}_{CZ21}$ — обмотки СЗ к фазе С ($\Delta\dot{U}_{C21}$) ЛЭП СВЭ. Значения падений напряжения определим по формулам

$$\Delta\dot{U}_{A21} = \dot{I}_{BY21} Z_{BX(21)}; \quad (3)$$

$$\Delta\dot{U}_{B21} = \dot{I}_{AX21} Z_{BX(21)}; \quad (4)$$

$$\Delta\dot{U}_{C21} = \dot{I}_{CZ21} Z_{BX(21)}. \quad (5)$$

где $Z_{BX(21)}$ — комплексное входное сопротивление ТП 21, Ом.

Оценку несимметрии падения напряжения выполним относительным коэффициентом несимметрии падения напряжения K_2 , %, по формуле

$$K_2 = \frac{\Delta U_{(A)2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (6)$$

где $U_{ном}$ — модуль номинального напряжения ЛЭП СВЭ, приведенный к тяговому напряжению, В; $\Delta U_{(A)2} = |\Delta\dot{U}_{(A)2}|$ — модуль комплексного падения напряжения обратной последовательности на входном сопротивлении узла подключения ТП 21 к фазе А ЛЭП СВЭ, В.

Падение напряжения обратной последовательности в узле подключения ТП 21 к фазе А ЛЭП СВЭ определим по формуле

$$\Delta\dot{U}_{(A)2} = \frac{1}{3}(\Delta\dot{U}_{A21} + a^2\Delta\dot{U}_{B21} + a\Delta\dot{U}_{C21}), \quad (7)$$

где $a = e^{j120}$ — оператор поворота.

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции к тяговой сети и ЛЭП СВЭ по существующей схеме представлены в табл. 3.

Модуль падения напряжения $\Delta\dot{U}_{B21}$ в 2 раза превышает модули $\Delta\dot{U}_{A21}$ и $\Delta\dot{U}_{C21}$. Высоконесимметричные токи обмоток создают высокую несимметрию напряжения в узлах подключения ТП к ЛЭП СВЭ, а также на шинах районного напряжения подстанции, что приводит к повышению потерь мощности в меди и стали тяговых трансформаторов относительно нормативных показателей.

Работоспособность ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», является узким местом в СТЭ ДВЖД. В условиях тяжеловесного движения вследствие увеличения токов ЭПС существенно возрастают потери напряжения на входных сопротивлениях и сопротивлениях обмоток, питающих левое и правое плечо ТП 16, ТП 18, ТП 21, что приводит к снижению напряжения в тяговой сети. В этой связи применение «подпитывающей» схемы подключения ТП не обеспечивает нормируемого напряжения на токоприемниках ЭПС. Это обстоятельство ограничивает повышение весовых норм поездов и снижение интервалов попутного следования. Для ТП, подключенных к тяговой сети по схеме «подпитывающих», характерны повышенные потери мощности в обмотках тяговых трансформаторов и напряжения на входных сопротивлениях ТП, что ухудшает показатели работы и снижает работоспособность СТЭ ДВЖД.

Нормализация схем подключения ТП к тяговой сети. В целях повышения эффективности работы СТЭ и качества взаимодействия СТЭ ДВЖД с СВЭ необходимо выполнить нормализацию схем питания тяговых нагрузок переходом к типовым [6, 7] схемам подключения ТП участка СТЭ ДВЖД ТП 15 — ТП 22 к тяговой сети и СВЭ. Один из вариантов подключения представлен на рис. 2. Предлагаемая схема фазировки участка обеспечивает чередование недогруженной фазы подстанций ТП 15 — ТП 22.

При типовой схеме подключения ТП 21 обмотка ВН АХ тягового трансформатора ТП 21 подключена к фазе А, обмотка ВУ — к фазе С, обмотка СЗ — к фазе В ЛЭП СВЭ. Тяговая обмотка ах питает правое плечо, обмотка сз — левое плечо ТП 21.

При типовой схеме подключения токи левого $\dot{I}_л$ и правого $\dot{I}_п$ плеча распределяются в обмотках тяговых трансформаторов в соотношении 2/3 и -1/3 [7], при этом 2/3 относится к обмотке, напряжение которой совпадает с напряжением плеча. Токи обмоток ВН тягового трансформатора ТП 21, приведенные к тяговому напряжению, определяются по формулам

$$\dot{I}_{AX21} = -\frac{1}{3}I_{Л21}e^{j(240-\varphi_{Л21})} + \frac{2}{3}I_{П21}e^{j(-\varphi_{П21})}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_{BY21} = -\frac{1}{3}I_{Л21}e^{j(240-\varphi_{Л21})} - \frac{1}{3}I_{П21}e^{j(-\varphi_{П21})}; \quad (9)$$

$$\dot{I}_{CZ21} = \frac{2}{3}I_{Л21}e^{j(240-\varphi_{Л21})} - \frac{1}{3}I_{П21}e^{j(-\varphi_{П21})}. \quad (10)$$

Таблица 3

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции по существующей схеме

Table 3

The results of calculating the asymmetry of voltage drops at the input resistances of traction substation 21 when connecting a substation according to the existing scheme

Показатель	Модуль, В	Аргумент, град. эл.
$\Delta \dot{U}_{A21}$	783	108
$\Delta \dot{U}_{B21}$	1567	-72
$\Delta \dot{U}_{C21}$	783	108
$\Delta \dot{U}_{(A)2}$	783	168
$K_2, \%$	2,85	

Таблица 4

Результаты расчета несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях ТП 21 при подключении подстанции по типовой схеме

Table 4

The results of calculating the asymmetry of voltage drops at the input resistances of traction substation 21 when connecting a substation according to a typical scheme

Показатель	Модуль, В	Аргумент, град. эл.
$\Delta \dot{U}_{A21}$	1036	67
$\Delta \dot{U}_{B21}$	1036	-91
$\Delta \dot{U}_{C21}$	392	168
$\Delta \dot{U}_{(A)2}$	392	108
$K_2, \%$	1,42	

Таблица 5

Экономическая оценка снижения годовых дополнительных потерь ЭЭ от уравнивающих токов при переходе к типовой схеме подключения ТП 21

Table 5

Economic evaluation of the reduction of annual additional losses of electricity from circulating currents during the transition to a typical connection diagram of traction substation 21

МПЗ	$\Delta P, \text{ кВт}$	$\Delta W_{\text{д}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	$\Delta C_{\text{эк}}, \text{ млн руб.}$
ТП 20–ТП 21	62	543 120	1,4
ТП 21–ТП 22	96	840 960	2,2
Общее	158	1 384 080	3,6

Токи обмоток ВН при $\dot{I}_{Л21} = \dot{I}_{П21} = 500e^{i(-32)} \text{ А}$ составляют

$$\dot{I}_{AX21} = 441e^{i(-13)} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BY21} = 167e^{i88} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{CZ21} = 441e^{i(-171)} \text{ А}.$$

Переход к типовым схемам подключения подстанций для рассмотренного примера обеспечивает понижение несимметрии токов обмоток в 2 раза, сокращение потерь в меди обмоток тягового трансформатора ТП 21 на 60 %, а также уменьшение температуры наиболее нагруженной тяговой обмотки на 32 %, что снижает интенсивность износа изоляции трансформатора.

В соответствии со схемой подключения ТП 21 ток $\dot{I}_{AX21}$ создает падение напряжения на входном сопротивлении узла подключения обмотки AX к фазе A , ток $\dot{I}_{BY21}$ — обмотки BY к фазе C , ток $\dot{I}_{CZ21}$ — обмотки CZ к фазе B ЛЭП СВЭ. Значения падений напряжения определим по формулам

$$\Delta \dot{U}_{A21} = \dot{I}_{AX21} Z_{BX(21)}; \quad (11)$$

$$\Delta \dot{U}_{B21} = \dot{I}_{CZ21} Z_{BX(21)}; \quad (12)$$

$$\Delta \dot{U}_{C21} = \dot{I}_{BY21} Z_{BX(21)}. \quad (13)$$

Падение напряжения обратной последовательно-сти на входных сопротивлениях ТП 21 определим по формуле (7). Результаты расчета несимметрии падений напряжения представлены в табл. 4.

Модули падений напряжения на входных сопротивлениях обмоток тягового трансформатора ТП 21, питающих левое и правое плечо, при типовой схеме в 1,5 раза меньше, чем при существующей схеме, что способствует повышению напряжения на тяговых шинах и увеличению пропускной способности участка. Значение коэффициента K_2 при типовой схеме подключения в 2 раза меньше, чем при существующей. Уменьшение несимметрии падений напряжения на входных сопротивлениях узлов подключения ТП к ЛЭП СВЭ повышает показатели совместной работы СВЭ и СТЭ ДВЖД.

Мероприятия повышения работоспособности СВЭ и СТЭ. Нормализация схем подключения ТП, подключенных к тяговой сети и ЛЭП СВЭ по схеме «подпитывающих», предусматривает изменение фазировки тяговой сети таким образом, что обмотка тягового трансформатора питает одно плечо. Подключение подстанций участка СТЭ ДВЖД по типовым схемам предусматривает установку четырех нейтральных вставок контактной сети в соответствии с требованиями [6]. Переход к типовым схемам подключения ТП

выполняется с изменением подключения обмоток районного напряжения тяговых трансформаторов к сетям районных потребителей.

Технико-экономическое обоснование перехода к типовым схемам подключения подстанций. Переход к типовым схемам подключения ТП, подключенных по схеме «подпитывающих», снижает негативное влияние на качество ЭЭ в системах внешнего и районного электроснабжения. При этом экономический эффект обеспечивается существенным снижением потерь ЭЭ, интенсивности термического износа изоляции обмоток тяговых трансформаторов и ограничения уравнильных токов в тяговой сети организацией подачи напряжения на плечи питания тяговой подстанции от двух обмоток трансформатора.

ТП, подключенные к тяговой сети по схеме «подпитывающих», соединены с ЛЭП классов напряжения 110 и 220 кВ. Питание левого и правого плеча одной обмоткой приводит к существенной потере напряжения таким образом, что напряжения на тяговых шинах смежных ТП, питающих одну МПЗ, существенно разнятся по поперечной составляющей и создают уравнильные токи. Уравнильные токи, в свою очередь, перегружают тяговые трансформаторы и приводят к дополнительным потерям мощности (ΔP) и ЭЭ (ΔW_d) в тяговой сети. При переходе к типовым схемам питания плеч двумя обмотками уравнильные токи снижаются.

Оценка снижения годового экономического ущерба $\Delta C_{\text{эк}}$ от дополнительных потерь ЭЭ, обусловленного снижением уравнильных токов в тяговой сети при типовой схеме подключения ТП 21 относительно существующей схемы, приведена в табл. 5.

При тарифе на ЭЭ для тяги 2,61 руб./кВт·ч снижение эффективного уравнильного тока на 150 А переходом ТП 21 от существующей схемы подключения к типовой схеме обеспечит уменьшение годовых дополнительных потерь ЭЭ на расчетную подстанцию на $\Delta W_d = 1,4$ ГВт·ч, что соответствует снижению экономического ущерба на $\Delta C_{\text{эк}} = 3,6$ млн руб.

Заключение. По результатам проведенного в статье анализа взаимодействия СТЭ и СВЭ определены четыре подстанции ДВЖД, функционирующие с низкими технико-экономическими показателями.

Разработаны схемы подключения ТП участка ДВЖД к тяговой сети и ЛЭП СВЭ, которые обеспечивают выполнение графика движения поездов в условиях тяжеловесного движения.

Нормализация схем подключения подстанций обеспечивает снижение потерь напряжения на входных сопротивлениях, что способствует повышению напряжения на тяговых шинах и позволяет повысить пропускную способность СТЭ ДВЖД.

Кроме того, обеспечивается уменьшение потерь мощности в меди тяговых трансформаторов для

расчетного примера на 60 %, понижение температуры нагрева наиболее нагруженной тяговой обмотки на 32 %, снижение несимметрии напряжений в СВЭ и уменьшение дополнительных потерь ЭЭ от уравнильных токов, что повышает работоспособность СТЭ ДВЖД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 25.06.2022).
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (Белая книга) [Электронный ресурс] / ОАО «РЖД». М., 2015. 68 с. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf (дата обращения: 25.06.2022).
3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 25.06.2022).
4. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 г. № 2718р. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 25.06.2022).
5. Vlasevsky S. V., Grigoriev N. P., Trofimovich P. N. Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90, no. 7. P. 522–525.
6. Тяговое электроснабжение железной дороги: свод правил: СП 224.1326000.2014: дата введения 2014-12-01 / Министерство транспорта Российской Федерации, ОАО «ВНИИЖТ». М.: Изд-во ВНИИЖТ, 2014. 86 с.
7. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
8. Веников В. А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учеб. для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981. 288 с.
9. Повышение эффективности сопряжения систем тягового и внешнего электроснабжения / В. Т. Черемисин [и др.] // Наука и транспорт. 2006. № 5. С. 18–21.
10. Повышение срока службы силовых трансформаторов в системе обеспечения движения поездов / Н. П. Григорьев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4 (49). С. 26–29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29).
11. Повышение эффективности работы тяговой подстанции переменного тока / Н. П. Григорьев [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2020. № 5. С. 13–16.
12. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. М.: Транспорт, 1965. 235 с.
13. Повышение эффективности работы систем внешнего и тягового электроснабжения / Н. П. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 4–5. С. 72–78.
14. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

15. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

REFERENCES

1. Long-term development program of the Russian Railways Company until 2025. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAg2RXSVoKu.pdf> (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

2. Strategy for scientific and technical development of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and up to 2025 (White Book). Moscow; 2015. 68 p. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

3. Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r. URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLI0nUT91RjCbeR.pdf> (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

4. Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2015 and for the future up to 2030. Approved by the order of Russian Railways Company dated December 15, 2011 No. 2718r. URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (access date: 25.06.2022). (In Russ.).

5. Vlasovsky S. V., Grigoriev N. P., Trofimovich P. N. Opposing Regulation of Performance Factors in an Alternating-Current Traction Power-Supply System. *Russian Electrical Engineering*. 2019;90(7):522–525.

6. Traction power supply of the railway: set of rules: SP 224.1326000.2014: introduction date 2014-12-01. Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow: VNIIZhT Publ.; 2014. 86 p. (In Russ.).

7. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog [Power supply of electrified railways]. 4th ed. Moscow: Transport Publ.; 1982. 528 p. (In Russ.).

8. Venikov V. A. Elektricheskie sistemy. Matematicheskie zadachi elektroenergetiki [Electric systems. Mathematical tasks of the electric power industry]. 2nd ed. Moscow: Vishaya Shkola Publ.; 1981. 288 p. (In Russ.).

9. Cheremisin V. T., Kondrat'ev Yu. V., Kvashchuk V. A., Koshanov A. L. Povysheniye effektivnosti sopryazheniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya [Increasing the efficiency of coupling systems of traction and external power supply]. *Nauka i transport = Science and transport*. 2006;(5):18–21. (In Russ.).

10. Grigor'ev N. P., Voprikov A. V., Kovalev V. A., et al. Povysheniye sroka sluzhby silovykh transformatorov v sisteme obespecheniya dvizheniya poezdov [Increasing the service life of power transformers in the system for ensuring the train traffic]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical systems and complexes*. 2020;4(49):26–29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-26-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-26-29). (In Russ.).

11. Grigor'ev N. P., Danilyuk A. V., Trofimovich P. N., Kovalev V. A. Povysheniye effektivnosti raboty tyagovoy podstantsii peremennogo toka [Improving the efficiency of the AC traction substation]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta = Electronics and electrical equipment of transport*. 2020;(5):13–16. (In Russ.).

12. Tamazov A. I. Nesimmetriya tokov i napryazheniy, vyzvaemaya odnofaznymi tyagovymi nagruzkami [Asymmetry of currents and voltages caused by single-phase traction loads]. Moscow: Transport Publ.; 1965. 235 p. (In Russ.).

13. Grigor'ev N. P., Ignatenko I. V., Kovalev V. A., Trofimovich P. N. Povysheniye effektivnosti raboty sistem vneshnego i tyagovogo elektrosnabzheniya [Improving the efficiency of external and traction power supply systems]. *Izvestiya visshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 2021;64(4-5):72–78. (In Russ.).

14. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Power quality: a guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ.; 2009. 456 p. (In Russ.).

15. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Int. standard. Introduced as Russian nat. standard on July 22, 2013 No. 400-st: introduction date 2014-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 18 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Николай Потапович ГРИГОРЬЕВ,

канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, 0101gnp@mail.ru), Author ID: 303445, <https://orcid.org/0000-0002-2800-2767>

Иван Владимирович ИГНАТЕНКО,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, systel@festu.khv.ru), Author ID: 512485, <https://orcid.org/0000-0003-3356-4059>

Сергей Анатольевич ВЛАСЕНКО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, vsa_ens@mail.ru), Author ID: 641533, <https://orcid.org/0000-0002-4028-8606>

Владимир Александрович КОВАЛЕВ,

аспирант, кафедра «Системы электроснабжения», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), Author ID: 1043617, <https://orcid.org/0000-0002-1356-189X>

Владимир Васильевич ШАТАЛОВ,

заместитель главного инженера, Трансэлектропроект (107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, д. 3, стр. 2, 8491v@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2351-4007>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay P. GRIGOR'EV,

Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., 0101gnp@mail.ru), Author ID: 303445, <https://orcid.org/0000-0002-2800-2767>

Ivan V. IGNATENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., systel@festu.khv.ru), Author ID: 512485, <https://orcid.org/0000-0003-3356-4059>

Sergey A. VLASENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St., vsa_ens@mail.ru), Author ID: 641533, <https://orcid.org/0000-0002-4028-8606>

Vladimir A. KOVALEV,

Postgraduate, Department of Power Supply Systems, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), Author ID: 1043617, <https://orcid.org/0000-0002-1356-189X>

Vladimir V. SHATALOV,

Deputy Chief Engineer, Transelektroproyekt (107140, Moscow, 3, bldg. 2, Verkhnyaya Krasnosel'skaya St., 8491v@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2351-4007>

ВКЛАД АВТОРОВ

Николай Потапович ГРИГОРЬЕВ. Разработка концепции статьи, формулирование целей, задач, структуры (20%).

Иван Владимирович ИГНАТЕНКО. Формирование направления исследования, анализ результатов (20%).

Сергей Анатольевич ВЛАСЕНКО. Анализ показателей работы участка ДВЖД (20%).

Владимир Александрович КОВАЛЕВ. Разработка новых схем подключения тяговых подстанций, расчет значений показателей работы подстанций участка ДВЖД при существующей и новой схемах (20%).

Владимир Васильевич ШАТАЛОВ. Сбор и структурирование информации о рассматриваемом участке ДВЖД, разработка новых схем подключения подстанций (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Nikolay P. GRIGOR'EV. Development of the concept of the article, formulation of goals, objectives, structure (20%).

Ivan V. IGNATENKO. Formation of research direction, analysis of results (20%).

Sergey A. VLASENKO. Analysis of performance indicators of the Far East Railway section (20%).

Vladimir A. KOVALEV. Development of new schemes for connecting traction substations, calculation of performance indicators of the Far Eastern Railway section substations with the existing and new schemes (20%).

Vladimir V. SHATALOV. Collection and structuring of information on the considered section of the Far Eastern Railway, development of new substation connection schemes (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.06.2022, первая рецензия получена 22.07.2022, вторая рецензия получена 27.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 30.06.2022, first review received 22.07.2022, second review received 27.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

ПОДПСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.212:004.94

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266

EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИНАЛЬНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ
ВНЕШНЕТОРГОВЫХ ГРУЗОВ НА ПОГРАНИЧНОЙ СТАНЦИИ ГРОДЕКОВО**

Р. Г. Король¹✉, О. Н. Числов²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
Хабаровск, Российская Федерация

²Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Транспортно-логистический бизнес претерпел значительные изменения в процессе преодоления вызовов, стоящих перед транспортной отраслью, требует новых подходов к рациональному использованию, а также внедрению инновационных технологических разработок при организации внешнеторговых перевозок. Особенно данный вопрос актуален в Дальневосточном регионе, где наблюдается дисбаланс поступающих грузопотоков и пропускной способности транспортной сети, что приводит к снижению качества транспортного обслуживания и конкурентоспособности транспортных коридоров, пролегающих по территории России. Ключевые элементы международных транспортных коридоров — транспортные узлы и пограничные пункты пропуска, поэтому целью исследования является оценка загруженности железнодорожного грузового терминала пункта пропуска Пограничный в рамках транспортного коридора «Приморье-1». Объект исследования — терминально-логистический комплекс пограничной станции Гродеково.

Материалы и методы. В данном исследовании использованы методы системного анализа и синтеза информации, а также программа имитационного моделирования работы технологических зон приграничного терминально-логистического центра.

Результаты. Разработанная программа имитационного моделирования позволила оценить загруженность участков складского терминала пограничной станции Гродеково по переработке внешнеторгового грузопотока, поступающего железнодорожным и автомобильным транспортом из провинции Хэйлунцзян (КНР). В статье представлены результаты имитационного моделирования.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов имитационного моделирования показал функционирование грузового терминала пограничной станции Гродеково при увеличении грузопотока, поступающего автомобильным транспортом для перегрузки на железнодорожный подвижной состав с учетом длительности таможенного оформления, ограниченности вместимости зоны хранения и грузового фронта, количества подъемно-транспортной техники. Дальнейшие исследования направлены на создание комплексной программы, учитывающей пропускную способность всей системы наземных пунктов пропуска Дальневосточного региона и объемы прогнозируемого грузопотока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: терминально-логистическая инфраструктура, имитационное моделирование, пограничные пункты пропуска

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Король Р. Г., Числов О. Н. Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>.

✉ kingkhv27@mail.ru (Р. Г. Король)

© Король Р. Г., Числов О. Н., 2022

Original article

UDK 656.212:004.94

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266

EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>



SIMULATION OF TERMINAL AND LOGISTICS PROCESSES OF FOREIGN TRADE CARGO PROCESSING AT THE GRODEKOVO BORDER STATION

Roman G. Korol'¹✉, Oleg N. Chislov²

¹Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russian Federation

²Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The transport and logistics business has undergone significant changes while overcoming the challenges facing the transport industry. It requires new approaches to rational use, as well as the introduction of innovative technologies in the organisation of foreign trade transportation. This issue is especially relevant in the Far East region, where there is an imbalance of incoming freight flows and traffic capacity of the transport network, which leads to a decrease in the quality of transport services and the competitiveness of transport corridors running through Russia. The key elements of international transport corridors are transport hubs and border checkpoints; therefore, the purpose of the study is to assess the workload of a railway cargo terminal of the Pogranichny checkpoint within the Primorye-1 transport corridor. The object of study is the terminal and logistics complex of the Grodekovo border station.

Materials and methods. In this study, methods of system analysis and information synthesis were used, as well as a programme for simulating the operation of technological zones of a border terminal and logistics centre.

Results. The developed simulation programme made it possible to assess the workload of the warehouse terminal of the Grodekovo border station for processing foreign trade freight flow arriving by rail and road from Heilongjiang Province (PRC). The article presents the results of simulation modelling.

Discussion and conclusion. Analysis of the results of simulation modelling showed the functioning of the cargo terminal of the Grodekovo border station with an increase in freight flow coming by road for reloading onto railway rolling stock, taking into account the duration of customs clearance, the limited capacity of the storage area and the cargo front, the number of handling equipment. Further research is aimed at creating a comprehensive programme that takes into account the traffic capacity of the entire system of ground checkpoints in the Far East region and the volume of the predicted freight flow.

KEYWORDS: terminal and logistics infrastructure, simulation modelling, border checkpoints

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Korol' R. G., Chislov O. N. Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):258-266. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>.

Введение. С февраля 2022 г. мировой логистический рынок и транспортно-логистическая отрасль России претерпели значительные изменения, которые коснулись устойчивости логистических цепей поставок, загрузки транспортной и терминально-логистической инфраструктуры, а также оперирования подвижным составом, транспортными средствами и транспортным оборудованием [1, 2]. Происходит перестройка транспортных маршрутов, появляются новые участники транспортного рынка и новые логистические схемы доставки грузов. Европейские транспортные компании, которые приостановили сотрудничество с Россией, предоставили возможность азиатским транспортным компаниям активизировать свою деятельность по организации перевозки грузов и контейнеров на восточном направлении. Внешнеторговый грузопоток перенаправляется в адрес дальневосточных морских портов и пограничных пунктов пропуска, что предъявляет дополнительные требования к уровню развития железнодорожной и портовой инфраструктуры.

Правительство Российской Федерации приостановило действие постановления от 25 ноября 2003 г. № 710 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования» сроком до 1 июля 2022 г., что позволило перепрофилировать терминальные объекты морских портов, расположенных в Хабаровском крае и на юге Приморского края, путем передачи части портовых производственных мощностей, предназначенных для перевалки угольной продукции, под обработку различной номенклатуры грузов, включая зерновые грузы, удобрения, металл и контейнеры [3]. Геополитическая ситуация и нарушение логистического взаимодействия между странами повлияли на сокращение числа судовых морских линий и, соответственно, снижение объемов поставки импортных товаров в Россию, поэтому ощущается нехватка контейнерного парка для отправки экспортных товаров. Несмотря на снижение грузооборота в транспортной отрасли, контейнерные перевозки железнодорожным транспортом за первый квартал 2022 г. показали рост на 10 % по сравнению с аналогичным периодом 2021 г. и составили 1,652 млн ДФЭ [4]. На Дальневосточной железной дороге за первый квартал 2022 г. выросли объемы погрузки вагонов с контейнерами: показатель составил порядка 70 тыс. вагонов, что на 33 % выше значений 2021 г. (погружено 45,77 тыс. вагонов). Сдерживающими факторами при организации транзита контейнеров на направлении Азия — Европа являются ограничение в пропуске транспортных средств на дальневосточных пограничных переходах, длительная обработка информации таможенными сервисами и недостаточная перерабатывающая спо-

собность терминально-логистической инфраструктуры морских портов [5].

Анализ текущего положения по организации транзитных перевозок грузов на Дальнем Востоке. Экономическая обстановка постоянно меняется, периодически появляется информация о приостановке деятельности промышленных и транспортных компаний или различных ограничениях в их деятельности, что негативно сказывается на долгосрочных контрактах и эффективности взаимодействия при осуществлении внешнеторговых перевозок грузов. Развитие приграничных дальневосточных регионов России направлено на расширение международного сотрудничества и организацию промышленного производства, ориентированного на экспорт готовой продукции в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Основными странами-контрагентами, с которыми бизнес-организации Дальнего Востока осуществляют внешнеэкономическую деятельность, являются Китайская Народная Республика (33,8 %), Республика Корея (24,3 %) и Япония (17,4 %), суммарный товарооборот трех стран составляет 75,5 % от общего объема товарооборота Дальнего Востока. По данным Дальневосточного таможенного управления, в 2020 г. объем внешней торговли субъектов Дальневосточного федерального округа достиг более 87,2 млн т (рис. 1), на сумму 32,12 млрд долларов, что составляет 5,62 % от общего объема внешней торговли Российской Федерации [6]. В январе — апреле 2022 г. внешнеторговый оборот между Россией и Китаем вырос на 25,9 % — до 51 млрд долларов, экспорт российских товаров вырос на 38 %, ввоз импортных товаров — на 11 % [7]. Такая динамика позволит достичь прогнозных значений годового товарооборота в 200 млрд долларов с опережением. Увеличение объемов внешней торговли произошло за счет внедрения системы диспетчеризации деклараций, что позволило распределить декларации по фактическим местам ввоза-вывоза товаров.

На российско-китайском участке государственной границы установлено 29 пунктов пропуска, которые осуществляют таможенные процедуры с транспортом и грузами, поступающими из провинции Хэйлунцзян Китайской Народной Республики (КНР) в приграничные регионы Дальнего Востока России. По территории Дальнего Востока проходят два основных международных транспортных коридора (МТК) «Приморье-1» и «Приморье-2», в рамках которых осуществляется транспортировка транзитного контейнеро- и грузопотока через пограничные переходы Гродеково — Суйфэнхэ (провинция Хэйлунцзян, КНР) и Махалино — Хунчунь (провинция Цзилинь, КНР) [8].

Компания «Российские железные дороги» производит реконструкцию пограничной станции Гродеково Дальневосточной железной дороги и развивает железнодорожную инфраструктуру на подходах к ней,

что позволит в 2024 г. обеспечить объем перевозок до 11,9 млн т в год. В соответствии с письмом Института экономики и развития транспорта (ИЭРТ) от 02.08.2021 № 12-02/202 перспективные объемы перевозок на 2024 г. через железнодорожный пункт пропуска (ЖДПП) Махалино—Хуньчунь может составить 4,2 млн т в год. Потенциальный объем перевозок по мостовому переходу Нижнеленинское (РФ)—Тунзян (КНР) при запуске ЖДПП Нижнеленинское в эксплуатацию в июле-августе 2022 г. может достигнуть к 2024 г. 6,4 млн т в год (таблица).

МТК «Приморье-1» включает ЖДПП и многосторонний автомобильный пункт пропуска (МАПП) Пограничный. На протяжении 2020–2022 гг. регулярно возникают очереди из грузовых автомобилей в ожидании пропуска через государственную границу в Китай [4]: причиной является введение китайской стороной ограничений в связи с ухудшением эпидемиологической ситуации в приграничных городах КНР. Транспортные компании вынуждены перенаправлять автотранспортные средства с приостановивших работу пунктов пропуска на функционирующие пункты пропуска, которые имеют ограниченную пропускную способность инфраструктуры, а также ограничения по перемещению транспортных средств со стороны таможенных структур Китая. Наиболее негативная ситуация с простоем грузового автотранспорта перед пунктом пропуска сложилась на погранпереходе Пограничный—Суйфэнхэ (рис. 2): ежедневно в ожидании таможенного оформления находится несколько десятков автомобилей, произошло увеличение сроков транспортировки грузов на 30–40 дней.

Ограничение пропускной способности автомобильных пунктов пропуска (АПП) Дальнего Востока привело к переориентации грузоотправителей на отправку грузов железнодорожным транспортом.

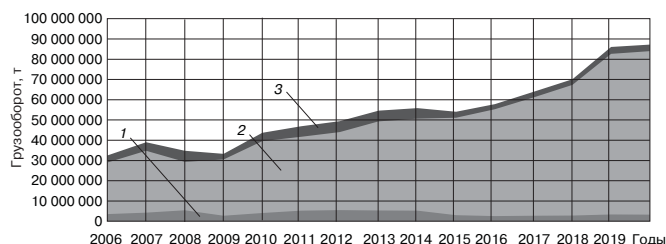


Рис. 1. Внешнеторговый грузооборот Дальневосточного федерального округа за 2006–2020 гг.: 1 — экспорт; 2 — импорт; 3 — грузооборот

Fig. 1. Foreign trade turnover of goods of the Far Eastern Federal District for 2006–2020: 1 — export; 2 — import; 3 — turnover of goods

Автомобильные грузопотоки направляются на терминально-логистические объекты пограничных железнодорожных станций для дальнейшей перегрузки на железнодорожный подвижной состав и перемещения через государственную границу. Ключевым элементом МТК «Приморье-1» является терминально-складская инфраструктура, состоящая из железнодорожных подходов, участков, ЖДПП и пограничной станции Гродеково. Терминально-складское хозяйство станции Гродеково включает открытые площадки для навалочных и тяжеловесных грузов, контейнерные площадки, эстакаду, современные крытый склад и зоны таможенных операций. Текущая неблагоприятная технологическая ситуация на автомобильных пограничных переходах может повлиять на загрузку технических средств и перерабатывающую способность складского терминала грузового двора станции Гродеково в связи с увеличением объемов переработки тарно-штучных грузов. С целью проведения исследований по техническим

Таблица

Перспективные объемы перевозок грузов железнодорожным транспортом до 2024 г., млн т

Table

Prospective volumes of hauling of goods by rail until 2024, in millions of tonnes

Наименование ЖДПП	2022	2023	2024	Примечание
ЖДПП Гродеково—Суйфэнхэ	9,5	10,9	11,9	Перспективные объемы на 2024 г. в соответствии с письмом ИЭРТ от 02.08.2021 № 12-02/202
ЖДПП Махалино—Хуньчунь	2,9	3,8	4,2	
ЖДПП Хасан—Туманган	0,0	0,0	0,0	Перевозки на данном направлении были прекращены в связи с политической обстановкой, планируется возобновление перевозок после стабилизации ситуации
Мостовой переход Нижнеленинское—Тунзян	2,5	3,8	6,4	Перспективные объемы на 2024 г. в соответствии с письмом ИЭРТ от 02.08.2021 № 12-02/202 (прогноз перевозок на 2022 г. запланирован исходя из запуска ЖДПП в эксплуатацию в июле-августе 2022 г.)
Итого	14,9	18,5	22,5	

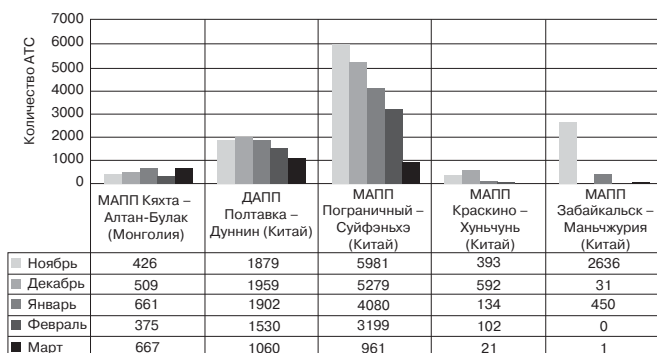


Рис. 2. Динамика формирования очереди автомобильных транспортных средств перед пунктами пропуска в ноябре 2021 г. — марте 2022 г.

Fig. 2. Dynamics of the formation of a queue of motor vehicles in front of checkpoints in November 2021 — March 2022

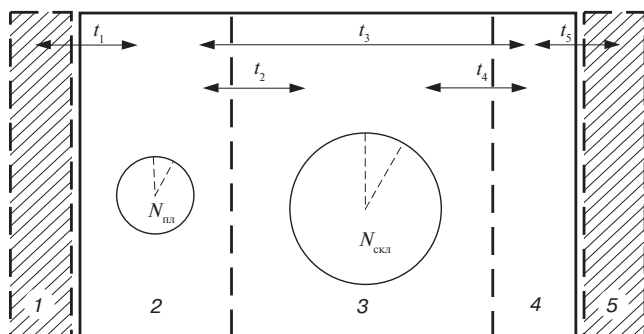


Рис. 3. Визуализация процесса перемещения грузовых единиц через технологические зоны приграничного терминала:

1 — железнодорожный подвижной состав; 2 — погрузочно-разгрузочная площадка с таможенной зоной; 3 — зона хранения; 4 — погрузочно-разгрузочная площадка автомобильного транспорта; 5 — автомобильные транспортные средства; $N_{пл}$, $N_{скл}$ — проектная вместимость погрузочно-разгрузочной площадки с участком таможенного осмотра и зоны хранения терминала соответственно

Fig. 3. Visualisation of the process of moving cargo units through the technological zones of the border terminal:

1 — railway rolling stock; 2 — loading and unloading area with a customs zone; 3 — storage area; 4 — loading and unloading area for road transport; 5 — motor vehicles; $N_{пл}$, $N_{скл}$ — design capacity of the loading and unloading area with the customs inspection area and the storage area of the terminal, respectively

возможностям, выявлению резервов и пределов пропускной способности складского терминала пограничной железнодорожной станции была разработана программа имитационного моделирования работы технологических зон приграничного терминально-логистического центра [9].

Описание программы имитационного моделирования.

Логика разработанной программы построена на последовательном перемещении транзакта — транспортно-складских пакетов через основные этапы складской

обработки приграничного терминала, включая таможенные операции (рис. 3) [10]. Программа имитационного моделирования учитывает совокупные временные затраты на осуществление складских операций с внешнеторговым грузопотоком. Пропускная способность рассматриваемого объекта будет зависеть от проектной вместимости погрузочно-разгрузочной площадки с участком таможенного осмотра $N_{пл}$ и зоны хранения терминала $N_{скл}$ и продолжительности выполнения технологических операций по перемещению внешнеторгового груза с железнодорожного на автомобильный транспорт и в обратном направлении, включая следующие этапы складской обработки: t_1 — выгрузка (погрузка) транспортно-складских пакетов из железнодорожного подвижного состава 1 на площадку для таможенного осмотра 2, t_2 — перемещение транспортно-складских пакетов из зоны грузовых операций и таможенного оформления в зону хранения склада 3, t_3 — трансфер транспортно-складских пакетов из приемоотправочной зоны железнодорожного транспорта на погрузочно-разгрузочную площадку автомобильного транспорта 4, t_4 — отборка и передача транспортно-складских пакетов из зоны хранения на временное размещение в зоне работы с автомобильным транспортом, t_5 — погрузочно-разгрузочные операции с автотранспортными средствами 5.

Разработанная программа имитационного моделирования является универсальной и позволяет установить имеющиеся узкие места в деятельности приграничного терминала с учетом: количества имеющейся подъемно-транспортной техники и при дополнительном привлечении машин, функционала и скорости работы подъемно-транспортного оборудования, емкости технологических зон склада, технических параметров и интервалов прибытия транспортных средств, а также затрат времени на проведение таможенных операций. Программа позволяет выявить и активировать резервы логистического терминала пограничной станции Гродеково, в том числе задавать различные сценарии работы терминала и в процессе моделирования вносить корректировки в работу подъемно-транспортной техники [11].

Результаты моделирования терминально-логистических процессов. В данном исследовании было произведено моделирование терминальных операций по обработке экспортно-импортных грузов на складском комплексе пограничной станции Гродеково по двум сценариям. Первый сценарий моделирования основан на текущих параметрах функционирования терминала: еженедельно прибытие четырех вагонов с общим количеством груза в 166 транспортно-складских пакетов, ежесуточно поступление пяти порожних автотранспортных средств под погрузку 40 транспортно-складских пакетов, состав механизированной бригады — четыре

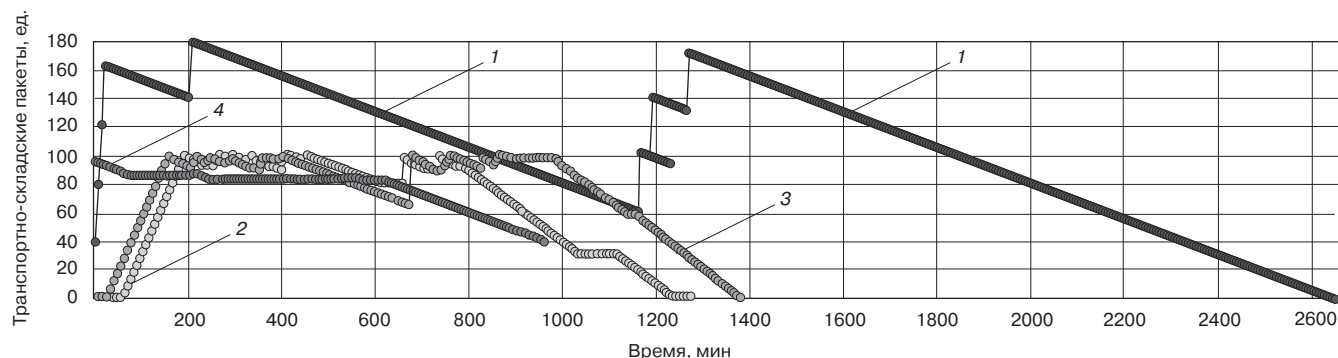


Рис. 4. Графическое представление загрузки подъемно-транспортного оборудования терминала пограничной станции Гродеково: 1 — операции по выгрузке транспортно-складских пакетов из вагонов на площадку с таможенной зоной; 2 — перемещение транспортно-складских пакетов с погрузочно-разгрузочной площадки в зону хранения; 3 — перемещение транспортно-складских пакетов с разгрузочной площадки железнодорожного транспорта на погрузочную площадку автомобильного транспорта; 4 — перемещение транспортно-складских пакетов из зоны хранения на погрузочную площадку автомобильного транспорта

Fig. 4. Graphical representation of the workload of the handling equipment of the Grodekovo border station terminal: 1 — operations for unloading transport and storage packages from cars to the site with the customs zone; 2 — movement of packages from the loading and unloading area to the storage area; 3 — movement of the packages from the railway unloading area to the road loading area; 4 — movement of the packages from the storage area to the loading area of road transport

автопогрузчика (рис. 4). Для получения результатов, приближенных к реальным условиям работы склада, имитация технологических процессов осуществлялась в течение семи суток.

Крытый терминал пограничной станции Гродеково, предназначенный для размещения тарно-штучных грузов с повышенным уровнем ионизирующего излучения, имеет вместимость 96 транспортно-складских пакетов. При текущей интенсивности поступления транспортных средств с грузом под обработку на терминале заполняемость складской зоны хранения составила 41 % (рис. 5, а).

Второй сценарий моделирования направлен на анализ складских процессов и загрузки терминала пограничной станции Гродеково при увеличении объемов работы: еженедельно прибывает четыре вагона с общим количеством груза в 166 транспортно-складских пакетов, ежедневно четыре порожних вагона, три порожних автомобиля под общую погрузку 24 транспортно-складских пакетов, 11 грузовых автомобилей под перегрузку груза на железнодорожный транспорт. В рамках исследования была увеличена емкость зоны хранения терминала до 600 транспортно-складских пакетов за счет более эффективного использования объемного пространства склада путем установки стеллажных конструкций. Одна единица подъемно-транспортного оборудования была дополнительно направлена на обслуживание автомобильных транспортных средств. Результаты моделирования показали, что на четвертые сутки работы терминала вместимость зоны хранения достигла пороговых значений, и резервы пропускной способности отсутствуют (рис. 5, б), а также макси-

мально загружены основные зоны складской системы станции Гродеково (рис. 6).

Сложившаяся экономико-политическая обстановка серьезно влияет на российский и мировой транспортно-логистический рынок, объемы перевозок, маршруты движения транспорта и грузов. Два ключевых тренда в логистическом бизнесе это переориентация внешнеторгового контейнеропотока с европейского на азиатско-тихоокеанское направление и увеличение объемов перевозок на альтернативных логистических маршрутах, проходящих в обход транспортной сети России.

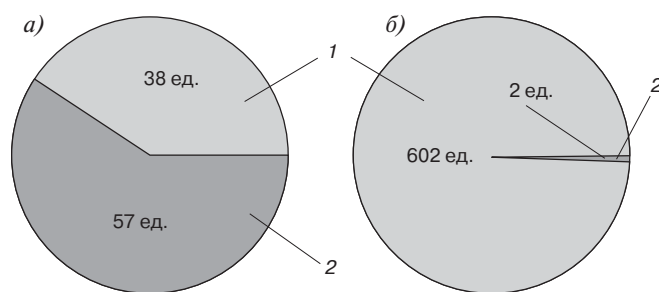


Рис. 5. Загруженность зоны хранения терминала пограничной станции Гродеково: а — в текущих условиях работы; б — при увеличении объемов переработки внешнеторговых грузов: 1 — количество транспортно-складских пакетов в зоне хранения; 2 — количество свободных ячеек стеллажей в зоне хранения склада

Fig. 5. The workload of the storage area of the border station Grodekovo terminal: а — in the current working conditions; б — with an increase in the volume of processing of foreign trade goods: 1 — the number of transport and storage packages in the storage area; 2 — the number of free rack cells in the warehouse storage area

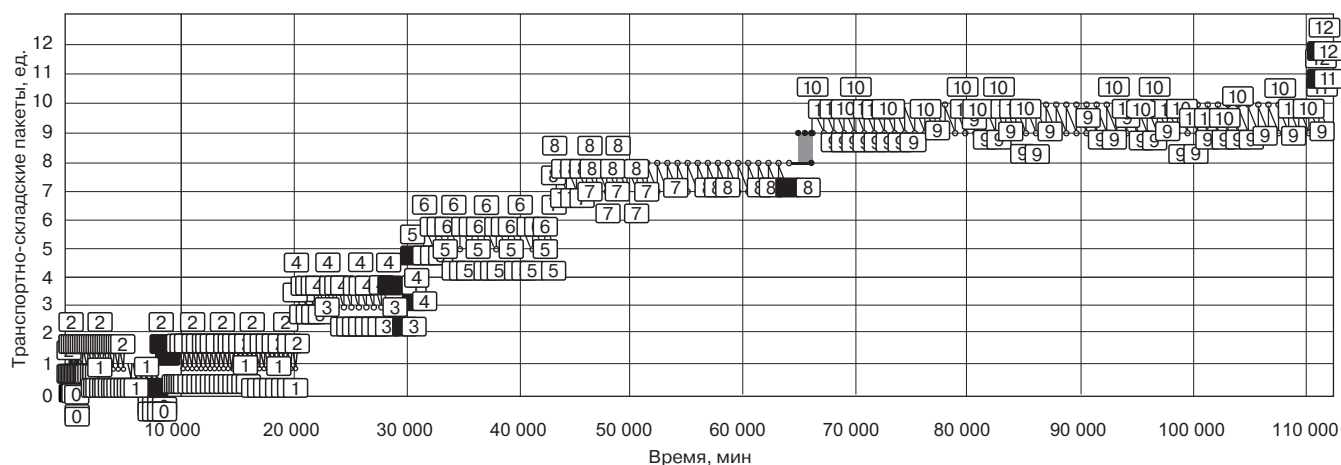


Рис. 6. Загруженность погрузочно-разгрузочной площадки железнодорожного транспорта с таможенной зоной

Fig. 6. Workload of the railway loading and unloading area with a customs zone

Поэтому необходимо обеспечить дополнительные терминально-складские мощности и бесперебойное функционирование дальневосточной транспортно-логистической инфраструктуры и наземных пограничных пунктов пропуска, а также рассмотреть вопросы организации приграничных транспортно-логистических центров [12] с цифровыми платформами взаимодействия участников международного процесса товародвижения [13].

Авторами данного исследования проанализированы технико-технологические параметры функционирования приграничного терминала станции Гродеково при существующих объемах переработки грузопотоков и в условиях увеличения поступления внешнеторговых грузов. Для более детального анализа работы грузового двора пограничных станций необходим комплексный подход, включающий оценку уровня загрузки терминальных мощностей и транспортной инфраструктуры, учитывая характер движения различных видов транспорта, ограниченность маневровых средств, железнодорожных путей, грузового фронта и т. д. Имитационная модель, направленная на решение данных задач, находится в стадии разработки.

В стратегических документах Правительства Российской Федерации и холдинга ОАО «Российские железные дороги» представлены позиции, отражающие потребность экономики страны в современной и развитой терминально-логистической инфраструктуре, позволяющей обеспечить транспортировку и переработку увеличивающихся объемов грузов и контейнеров в международном сообщении. В федеральных программах определен перечень дальневосточных пунктов пропуска, которые будут реконструированы или созданы:

- реконструкция МАПП Краскино-1 с целью увеличения пропускной способности до 250 транспортных средств в сутки и строительство МАПП Краскино-2 с увеличением пропуска до 750 транспортных средств в сутки;
- реализация проекта АПП Марково (пограничный переход Марково — Хулинь) до 2023 г.;
- создание МАПП на базе двустороннего пункта пропуска (ДАПП) Турий Рог (пограничный переход Турий Рог — Мишань) до 2023 г.;
- восстановление после паводка и модернизация грузо-пассажирского ДАПП Полтавка (пограничный переход Полтавка — Дуннин).

Рациональная и сбалансированная загрузка транспортной системы Дальний Восток — страны АТР возможна при комплексном рассмотрении вопросов распределения грузо- и контейнеропотоков между мультимодальными транспортными узлами и пограничными переходами в зависимости от пропускной способности транспортной и терминально-логистической инфраструктуры. Оценка технико-технологических параметров ключевых элементов МТК в условиях неритмичной работы морских портов, изменения объемов экспортного и импортного грузопотоков, приостановки деятельности пограничных пунктов пропуска, перенаправления транспортного потока на логистические объекты ближайших транспортных коридоров и других сложно прогнозируемых ситуаций должна происходить путем динамического моделирования. Первым этапом создания обозначенной программы является разработанный модуль имитационного моделирования работы совмещенного (железнодорожно-автомобильного) пограничного пункта пропуска [14], что позволит оценить загрузку ЖДПП и АПП одного региона при перенаправлении

транспортных средств. Помимо инфраструктурных вопросов существуют технологические ограничения эффективности организации международных перевозок. Перспективные научные исследования в данной области связаны с развитием нейросетевых технологий [15], позволяющих моделировать с учетом статистических данных в реальном режиме времени с помощью различных датчиков приборов и систем видеонаблюдения текущую работу и прогнозировать различные сценарии взаимодействия видов транспорта на терминальных объектах, а также внутритерминальную работу.

Заключение. Выполненное исследование позволило определить количественные показатели функционирования рассматриваемой складской системы при увеличении объемов работы, а именно изменение динамики вместимости зоны хранения от 41 до 95 %, увеличение на 47 % транспортно-складских пакетов, перемещаемых с площадки железнодорожного транспорта в зону хранения, увеличение на 62 % количества обрабатываемого груза, поступающего автомобильным транспортом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чумляков К.С. Стратегическая конкурентоспособность национальной транспортной инфраструктуры в пространстве международных транзитных перевозок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. № 1. С. 49–54.
2. Покровская О.Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 80–94.
3. Приостановлено правило недискриминационного доступа к железнодорожной инфраструктуре [Электронный ресурс] // INTERFAX.RU: международная информационная группа: [сайт]. URL: <https://www.interfax.ru/business/827023> (дата обращения: 06.05.2022).
4. Перевозки контейнеров по сети РЖД выросли на 10 % за 3 месяца [Электронный ресурс] // RZD.RU. Грузовые перевозки. Инфраструктура. Новости: [сайт]. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9514/page/3104?id=272371> (дата обращения: 11.05.2022).
5. Ковалев Г.А., Числов О.Н., Супрун Е.Е. Развитие контейнерных железнодорожных перевозок из Китая в Европу с использованием транзита // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 3–4 февраля 2020 г.) / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д.: РГУПС, 2020. С. 121–125.
6. Внешняя торговля ДФО [Электронный ресурс] // Дальневосточное таможенное управление: официальный сайт. URL: https://dvtu.customs.gov.ru/statistic/2021-god/ItoGovaya_informaciya (дата обращения: 15.05.2022).
7. Товарооборот России и Китая в январе–апреле вырос на 25,9 % [Электронный ресурс] // INTERFAX.RU: международная информационная группа: [сайт]. URL: https://tass.ru/ekonomika/14579791?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 15.05.2022).
8. Король Р.Г. Формирование приграничной терминально-логистической инфраструктуры для организации контейнерных перевозок на направлении Суйфэньхэ (КНР) — Гродеково (РФ) // Известия Транссиба. 2022. № 1 (49). С. 43–56.

9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021680586 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования работы технологических зон приграничного терминально-логистического центра: № 2021669818: заявл. 30.11.2021; опубл. 13.12.2021 / Король Р.Г.

10. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О.Н. Числов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2021. № 1 (81). С. 104–114.

11. Псеровская Е.Д., Кагадий И.Н. Моделирование грузовой работы станции во взаимодействии с путями необщего пользования // Известия Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 91–96.

12. Коровяковский Е.К., Покровская О.Д. Содержательное описание логистического центра и его роли в системе МТК // Известия Петербургского университета путей сообщения (Известия ПГУПС). 2014. № 3 (40). С. 22–28.

13. Пугачёв И.Н., Куликов Ю.И. Особенности цифрового взаимодействия в транспортном комплексе // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады Тринадцатой науч.-практ. конф. (Владивосток, 12–13 ноября 2019 г.). Владивосток, 2019. С. 288–291.

14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022616668 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования работы совмещенного (железнодорожно-автомобильного) пограничного пункта пропуска: № 2022615810: заявл. 04.04.2022; опубл. 15.04.2022 / Король Р.Г.

15. Лапидус Б.М. О создании Интеллектуальной мультимодальной транспортной системы России и проекта «Интеллектуальный контейнерный конвейер» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 5. С. 276–281. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281>.

REFERENCES

1. Chumlyakov K. S. Strategicheskaya konkurentosposobnost' natsional'noy transportnoy infrastruktury v prostranstve mezhdunarodnykh tranzitnykh perevozok [On the Long-Term Competitiveness Provisions of the National Transport Infrastructure in the International Freight Transit Space]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2015;(1):49-54. (In Russ.).
2. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems in Russia under the new sanctions]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy = Bulletin of scientific research results*. 2022;(1):80-94. (In Russ.).
3. Priostanovleno pravilo nediskriminatsionnogo dostupa k zheleznodorozhnoy infrastrukture [The rule of non-discriminatory access to railway infrastructure has been suspended]. INTERFAX.RU: website. URL: <https://www.interfax.ru/business/827023> (access date: 06.05.2022). (In Russ.).
4. Perevozki konteynerov po seti RZhD vyrosli na 10 % za 3 mesyatsa [Transportation of containers through the Russian Railways network increased by 10 % in 3 months]. RZD.RU: website. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9514/page/3104?id=272371> (access date: 11.05.2022). (In Russ.).
5. Kovalev G. A., Chislov O. N., Suprun E. E. Razvitie konteynernykh zheleznodorozhnykh perevozok iz Kitaya v Evropu s ispol'zovaniem tranzita [Development of container rail transportation from China to Europe using transit]. *Transport i logistika: prostranstvenno-tekhnologicheskaya sinergiya razvitiya* [Transport and logistics: spatial and technological synergy of development]. *Procs. of IV Int. scientific-practical conf. (Rostov-on-Don, February 3–4, 2020)*. Rostov on Don: RSTU, 2020. P. 121–125. (In Russ.).
6. Vneshnyaya trgovlya DFO [Foreign trade of the Far Eastern Federal District]. Far Eastern Customs Administration: official website. URL: https://dvtu.customs.gov.ru/statistic/2021-god/ItoGovaya_informaciya (access date: 15.05.2022). (In Russ.).

7. Tovaroborot Rossii i Kitaya v yanvare–aprele vyros na 25,9% [Trade turnover between Russia and China in January–April increased by 25.9%]. INTERFAX.RU: website. URL: https://tass.ru/ekonomika/14579791?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (access date: 15.05.2022). (In Russ.).

8. Korol' R.G. Formirovanie prigranichnoy terminal'no-logisticheskoy infrastruktury dlya organizatsii konteylernykh perevozok na napravlenii Suyfen'khe (KNR) — Grodekovo (RF) [Formation of a border terminal and logistics infrastructure for the organization of container transportation in the direction of Suifenhe (PRC) — Grodekovo (RF)]. *Izvestiya Transsiba = Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;1(49):43–56. (In Russ.).

9. Korol' R.G. Certificate of registration of the computer program No. 2021680586 Russian Federation. Simulation program for the operation of technological zones of the border terminal and logistics centre: No. 2021669818: appl. 30.11.2021: publ. 13.12.2021. (In Russ.).

10. Chislov O. N., Trapenov V. V., Alabina V. V., Bakalov M. V. Metody formirovaniya i printsipy intellektualizatsii v upravlenii terminal'no-skladskoy sistemoy transportnogo uzla [Methods of formation and principles of intellectualization in the management of the terminal-warehouse system of the transport hub]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya (Vestnik RGUPS) = Bulletin of RSTU*. 2021;1(81):104–114. (In Russ.).

11. Pserovskaya E. D., Kagadiy I. N. Modelirovanie gruzovoy raboty stantsii vo vzaimodeystvii s putyami neobshchego pol'zovaniya [Modelling of cargo operation of the station in interaction with non-public tracks]. *Izvestiya Transsiba = Journal of Transsib Railway Studies*. 2016;1(25):91–96. (In Russ.).

12. Korovyakovskiy E. K., Pokrovskaya O. D. Soderzhatel'noe opisaniye logisticheskogo tsentra i ego roli v sisteme MTK [Meaningful description of the logistics center and its role in the MTK system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya (Izvestiya PGUPS) = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2014;3(40):22–28. (In Russ.).

13. Pugachev I. N., Kulikov Yu. I. Osobennosti tsifrovogo vzaimodeystviya v transportnom komplekse [Features of digital interaction in the transport complex]. Problemy transporta Dal'nego Vostoka [Problems of transport of the Far East]. Procs. of the Thirteenth scientific and practical conf. (Vladivostok, November 12–13, 2019). Vladivostok; 2019. P. 288–291. (In Russ.).

14. Korol' R.G. Certificate of registration of the computer program No. 2022616668 Russian Federation. Simulation program for the operation of a combined (railway and automobile) border checkpoint: No. 2022615810: appl. 04.04.2022: publ. 15.04.2022.

15. Lapidus B. M. O sozdaniy Intel'ktual'noy mul'timodal'noy transportnoy sistemy Rossii i proekta "Intel'ktual'nyy konteynernyy konveyer" [On the creation of the Intelligent multimodal transport system of Russia and the project "Intelligent container chain"]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2020;79(5):276–281. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-5-276-281>. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Григорьевич КОРОЛЬ,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология транспортных процессов и логистика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, д. 47), Author ID: 729080, <https://orcid.org/0000-0002-7522-1604>

Олег Николаевич ЧИСЛОВ,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Станции и грузовая работа», Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, sgr@rgups.ru), Author ID: 474458, <https://orcid.org/0000-0001-7800-0113>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman G. KOROL',

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Technology of Transport Processes and Logistics Department, Far Eastern State Transport University (680021, Khabarovsk, 47, Serysheva St.), Author ID: 729080, <https://orcid.org/0000-0002-7522-1604>

Oleg N. CHISLOV,

Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Stations and Cargo Work, Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., sgr@rgups.ru), Author ID: 474458, <https://orcid.org/0000-0001-7800-0113>

ВКЛАД АВТОРОВ

Роман Григорьевич КОРОЛЬ. Имитационное моделирование, анализ показателей, сбор исходных данных (50%).

Олег Николаевич ЧИСЛОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, анализ результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Roman G. KOROL'. Simulation modelling, analysis of indicators, collection of initial data (50%).

Oleg N. CHISLOV. Formation of research direction, formulation of goals and objectives, analysis of results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 31.05.2022, первая рецензия получена 06.06.2022, вторая рецензия получена 05.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 31.05.2022, first review received 06.06.2022, second review received 05.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.073.235

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276

EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>



СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ
ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ

О. В. Москвичев✉, Е. Е. Москвичева

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Формирование в Российской Федерации опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров с организацией на ее основе скоростного грузового движения по расписанию требует разработки научно обоснованных предложений по созданию или модернизации соответствующей региональной транспортно-логистической инфраструктуры. Одной из важнейших задач при реализации данного проекта в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов является правильное обоснование количества и выбора мест размещения транспортно-логистических центров опорной сети на территории РФ, а также мест локаций транспортно-логистических центров в субъектах РФ.

Материалы и методы. В работе выполнены оценочный анализ классических методов нахождения оптимальных центров на плоскости и некоторое построение математических количественных моделей оптимального размещения транспортно-логистических объектов.

Результаты. Согласно данным оценочного анализа предложена научно обоснованная концепция системного подхода к вопросам рационального проектирования и размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры, в частности опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров как части новой высокоэффективной транспортно-логистической инфраструктуры РФ и ее международных транспортных коридоров.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследования могут быть использованы для научно обоснованного принятия решений в инвестиционных проектах, связанных с развитием транспортно-логистической инфраструктуры как регионального, так и федерального уровня: обоснования мест размещения и технологических мощностей объектов транспортно-логистической инфраструктуры; определения потребности развития объектов региональной транспортно-логистической инфраструктуры с учетом устранения их лимитирующих узких мест; реализации поэтапного комплекса мероприятий по модернизации существующего терминально-логистического комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контейнерно-транспортная система, размещение транспортных объектов, математическая модель, кластерный анализ, контейнерные перевозки

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Москвичев О. В., Москвичева Е. Е. Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 267–276. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>.



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.073.235

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276

EDN: <https://elibrary.ru/bpxeol>



SYSTEM ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF PLACEMENT OF TRANSPORT AND LOGISTICS FACILITIES OF DIFFERENT LEVELS

Oleg V. Moskvichev✉, Elena E. Moskvicheva

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The formation of an overarching network of nodal freight multimodal transport and logistics centres in the Russian Federation and organisation of high-speed freight traffic on schedule on its basis requires the development of science-based proposals for the creation or modernisation of the corresponding regional transport and logistics infrastructure. One of the most important tasks in the implementation of this project in the context of limited investment resources is the correct justification of the number and choice of locations for the transport and logistics centres of the overarching network in the Russian Federation, as well as the locations of transport and logistics centres in the constituent entities of the Russian Federation.

Materials and methods. This article provides an evaluation analysis of the classical methods for finding optimal centres on a plane and some construction of mathematical quantitative models for the optimal placement of transport and logistics facilities.

Results. According to the evaluation analysis, the authors have drafted a scientifically based concept of a systematic approach to the issues of rational design and placement of elements of transport and logistics infrastructure, in particular, the overarching network of nodal freight multimodal transport and logistics centres, as part of a new highly efficient transport and logistics infrastructure of the Russian Federation and its international transport corridors.

Discussion and conclusion. The obtained results of the study can be used for scientifically based decision-making in investment projects related to the development of transport and logistics infrastructure at both regional and federal levels: substantiation of locations and technological capacities of transport and logistics infrastructure facilities; determining the need for the development of objects of the regional transport and logistics infrastructure, while eliminating their bottlenecks; implementation of a phased set of measures to modernise the existing terminal and logistics complex.

KEYWORDS: container transport system, placement of transport facilities, mathematical model, cluster analysis, containerized shipment

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Moskvichev O.V., Moskvicheva E.E. System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):267-276. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276>.

Введение. Формирование в Российской Федерации опорной сети узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров (ТЛЦ) с организацией на ее основе скоростного грузового движения по расписанию требует разработки научно обоснованных предложений по созданию или модернизации соответствующей региональной транспортно-логистической инфраструктуры. Одной из важнейших задач при реализации данного проекта в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов является правильное обоснование количества и выбора мест размещения ТЛЦ опорной сети на территории РФ, а также мест локации ТЛЦ в субъектах РФ. При этом следует учитывать не только необходимость решения актуальных задач реализации транзитного потенциала страны, развития экспорта транспортных услуг, но и повышение уровня экономической связанности территории РФ. Очевидно, что сетевой подход к формированию инфраструктуры ТЛЦ должен предусматривать реализацию единого научно обоснованного системного подхода к вопросам размещения транспортно-логистической инфраструктуры различного уровня. Это обуславливает необходимость проведения оценочного анализа существующих методов определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов с последующей рекомендацией метода для сетевого подхода к формированию инфраструктуры ТЛЦ.

Материалы и методы. Проблемы, связанные с разработкой стратегических решений по развитию терминально-логистической инфраструктуры, характеризуются высокой сложностью из-за большой размерности и многовариантности решаемой задачи.

Проанализируем некоторые классические задачи, связанные с определением оптимального расположения точек на плоскости и реализующие алгоритмы, которые можно использовать в более общей постановке задачи оптимизации размещения транспортно-логистических объектов [1]:

1) Для заданных n точек найти один геометрический центр, сумма расстояний от которого до этих точек минимальна.

Решением задачи служит точка Торичелли [2]. При этом для $n \geq 5$ задача решается приближенно.

2) Для заданных k точек найти центр, лежащий на заданной прямой, чтобы суммарное расстояние от центра до точек было минимальным.

Решением является точка прямой l , для которой сумма проекций на прямую k единичных векторов, направленных из нее в данные точки, равна нулю. Если из данных k точек есть хотя бы одна, не лежащая на прямой l , то задача имеет единственное решение. Если $k \geq 3$, то такая точка, собственно говоря, не строится геометрически, а находится приближенно

(вычисление ее координаты приводит к уравнению высокой степени). Известно большое число эвристических алгоритмов, применяемых для решения данной задачи.

3) Для заданных n точек найти такую сеть дорог, чтобы общая длина дорог, соединяющая точки, была минимальной. Решение — сеть Штейнера [2]. При этом для $n \geq 5$ задача решается приближенно (перебором вариантов).

Таким образом, рассмотренные классические математические задачи определяют оптимальные свойства некоторых точек при заданном их множестве. Решение задач на основе подобных математических моделей, даже для небольшого числа центров, показывает высокую сложность вычислений. Кроме того, в реализующем алгоритме выбор центра является свободным на некоторой территории, что не соответствует основному требованию при создании транспортно-логистической инфраструктуры, предполагающему максимальную близость к магистральным транспортным (железнодорожным, водным, автодорожным) коммуникациям.

Анализ научных работ, посвященных проблеме выбора мест размещения транспортно-логистических объектов различного уровня, показывает, что эта задача принадлежит к более общей математической задаче оптимального выбора мест размещения центров обслуживания при заданных объектах обслуживания. При этом оптимальное решение размещения центров обслуживания потребителей зависит от выбранных критериев, принятых ограничений и основывается на применении различных подходов, среди которых можно отметить метод ветвей и границ, методы динамического программирования, методы целочисленного программирования, вероятностные методы, различные эвристические методы и т. п. [3–7]. Например, в обзоре М. Л. Брандо и С. С. Чина [8] представлено более 50 различных моделей, которые можно использовать для решения задач выбора размещения центров обслуживания.

В целом задачи подобного типа можно классифицировать следующим образом [1, 9]:

1) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа заданных потребителей при условии, что центры могут располагаться в некоторых точках заданного конечного множества. В результате эту задачу можно рассматривать как оптимизационную задачу, где центры обслуживания могут быть расположены в вершинах графа, а расстояния измеряются по длинам ребер графа. При такой постановке получаем так называемую дискретную модель.

2) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа заданных потребителей при условии, что центры могут располагаться в произвольных точках некоторой заданной области. При этом центр обслуживания может быть расположен в

любой точке области, а потребитель располагается в заданных точках, что приводит к решению непрерывной модели в виде задачи нелинейного программирования большой размерности. Расстояние перевозки измеряется по вводимой метрике, например по евклидовой или иной.

3) Оптимизация размещения центров для обслуживания конечного числа потребителей при условии, что потребители и центры могут располагаться в произвольных точках заданной области (расстояние измеряется по вводимой метрике). Такая постановка приводит к решению непрерывной модели в виде задачи нелинейного программирования сверхбольшой размерности.

Покажем возможность разработки математической модели оптимального выбора мест размещения ТЛЦ опорной сети в рамках подхода на основе модели математического программирования. Очевидно, что для решения такой задачи для всей территории РФ придется разбивать ее на определенные иерархические уровни. При этом необходимо определиться со средними статическими параметрами сети дорог и средними релевантными объемами перевозок грузов. В качестве центров (вершин сети перевозок) можно рассматривать субъекты РФ (области, республики и т. д.), а в качестве сети дорог лишь основные магистральные пути. Тогда можно поставить и решить задачу: найти места размещения ТЛЦ на всей территории страны, считая, что их количество много меньше, чем число субъектов (вершин). Здесь можно задать количество предполагаемых ТЛЦ или использовать ограничения на общий объем финансирования.

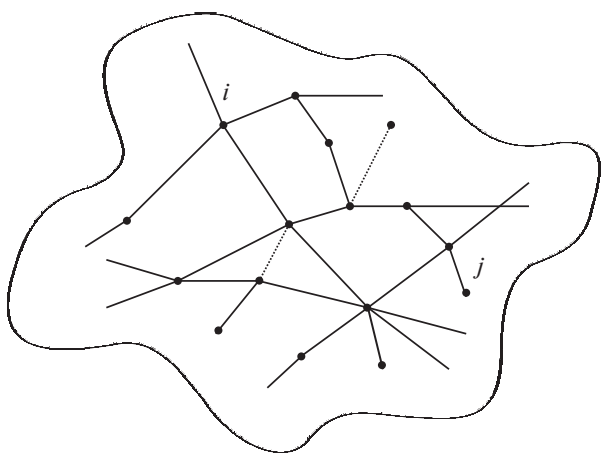


Рис. 1. Пункты (вершины) и неоднородная сеть дорог.
Сплошная линия — железнодорожное сообщение,
пунктирная — автомобильное

Fig. 1. Points (vertices) and heterogeneous road network.
The solid line is rail traffic, the dotted line is road traffic

Решение такой задачи имеет оценочное значение, которое позволяет поставить и решать подобные задачи на нижних уровнях иерархии: для территории экономических округов, республик, областей. Сама задача оптимизации выбора размещения ТЛЦ должна обладать свойством подобия для постановок различного иерархического уровня. При этом решения на верхних уровнях дают лишь теоретические результаты, а не фактические проектные решения для построения физических ТЛЦ.

В целях получения единой математической модели ниже будем рассматривать некоторую ограниченную плоскую область, на которой задана сеть пунктов (вершин), соединенных неоднородными ребрами (однаправленными или двуправленными (рис. 1)).

Пункты (вершины), расположенные в рассматриваемой ограниченной области, описывают:

- 1) промышленные объекты;
- 2) города;
- 3) железнодорожные станции;
- 4) имеющиеся ТЛЦ.

Ребра графа описывают сеть железных и шоссейных дорог: пункты 1–4 определяются точками (вершинами графа) с заданными координатами; i — номер вершины; (x_i, y_i) — декартовы координаты. Ребра неоднородные. В каждой вершине i известен релевантный объем грузов. Обозначим его a_i . Данная величина включает как имеющиеся фактические объемы грузоперевозок, так и ожидаемые объемы на некоторый проектный период. Величина a_i отображает объем только собственно данной вершины без учета дополнительного объема грузопереработки, который образуется, если данная вершина будет ТЛЦ.

Известно расстояние перевозки грузов из точки i в точку j — c_{ij} . В простейшем случае c_{ij} — расстояние в километрах, но в реальных задачах c_{ij} может включать все трудности, возникающие при перевозке из i в j , а именно:

- 1) ограничения пропускной способности инфраструктуры из i в j ;
- 2) необходимость перевалки грузов — автомобиль — вагон и наоборот;
- 3) тарифы;
- 4) пробки на шоссейных дорогах и т. д.

Все это можно учесть в отдельной методике вычисления c_{ij} . Существуют методики определения c_{ij} по геоинформационным картам. В общем случае c_{ij} может зависеть от времени, графика движения поездов и др. Ниже будем считать, что c_{ij} известно и не зависит от времени, т. е. рассматривается статическая задача.

Предлагается экономико-математическая модель синтеза точек местонахождения ТЛЦ для некоторой территории (область, округ, республика, страна). Решить такую задачу — значит определить те точки i ,

которые и будут ТЛЦ. Пусть уже известно, сколько ТЛЦ должно быть в заданном районе — m .

Тогда задача ставится следующим образом: для заданного графа вершин и ребер найти такие вершины (всего их m), чтобы они в каком-либо оптимальном смысле покрывали все объемы грузопереработки всех узлов J ($j = \overline{1, n}$). Обозначим I — множество покрывающих вершин. Таким образом, I — подмножество вершин из J .

Существующие подходы для решения подобных задач используют методы оптимальных покрытий [10]. Вопрос о том, что некоторый узел j будет обслуживаться ТЛЦ i , не совсем связан с геометрической близостью пунктов i и j . Поэтому правильной ставить вопрос о мере c_{ij} , непосредственно учитывающей все многообразие факторов удобства обслуживания j -го узла i -м ТЛЦ. Это особенно проявляется при рассмотрении строительства ТЛЦ вблизи крупных городов. Поэтому c_{ij} это некоторая мера, выражающая общую экономическую эффективность того, что узел j обслуживается ТЛЦ i .

Введем управляемые переменные x_{ij} :

$x_{ij} = \{1\}$, если j -й узел будет обслуживаться i -м ТЛЦ;

$x_{ij} = \{0\}$ — в противном случае.

Матрица $X = \{x_{ij}\}$ — это решение. Матрица X содержит n строк и n столбцов, но так как $m < n$, некоторые строки состоят только из нулей.

Сформулируем некоторые ограничения на эти переменные и введем в рассмотрение целевую функцию $F(x_{ij})$, которая бы количественно выражала степень общей экономической эффективности от создания сети ТЛЦ именно при каждом решении $\{x_{ij}\}$.

Каждый узел j прикрепляется только к одному ТЛЦ из I , поэтому

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Если можно, чтобы узел i прикреплялся хотя бы к одному ТЛЦ, то

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

$X = \{x_{ij}\}$ представляет собой матрицу нулей и единиц. Согласно (1) допустимой будет такая матрица, в которой в каждом столбце j будет лишь одна единица. Например,

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Очевидно $m \leq n$. Поэтому строк, содержащих хотя бы одну единицу, будет $m < n$, остальные — нулевые.

Таким образом, если количество ТЛЦ задано, а именно m , то

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m, \quad (3)$$

где $|a|_{0,1}$ означает

$$|a|_{0,1} = \begin{cases} 0, & \text{если } a = 0; \\ 1, & \text{если } a > 0. \end{cases}$$

Видно, что матрица X может изображать допустимое решение, когда m заранее не задано. Тогда (3) можно убрать из рассмотрения.

Общий объем переработки грузов в i -м ТЛЦ складывается из объемов тех вершин J , которые обрабатываются i -м ТЛЦ. Он определяется как

$$A_i = \sum_{j=1}^n a_i x_{ij}, i = \overline{1, m}.$$

Если необходимо, чтобы $A_{\min} \leq A_i \leq A_{\max}$, то возникают ограничения:

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\max}, i = \overline{1, m}; \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\min}, i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведен пример решения задачи для $m = 2, n = 10$.

При разработке целевой функции следует отметить два подхода: интегральный и гарантирующий (минимаксный).

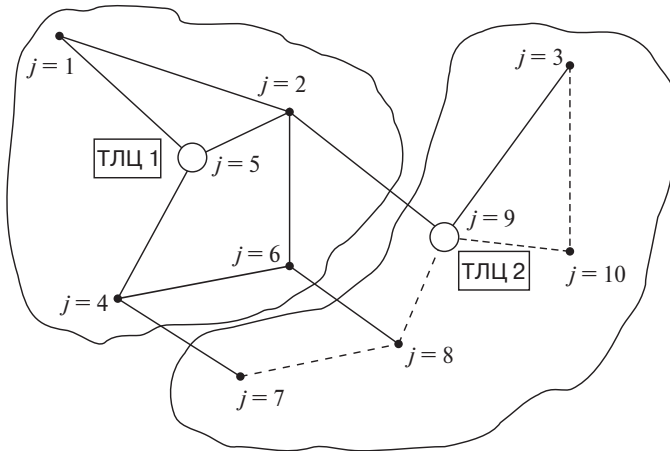
Первый подход основан на том, что проект создания сети ТЛЦ нацелен на получение синергетического эффекта в целом для системы. Обычно все стоимостные (экономические) критерии основываются на этом. В примере в качестве такой целевой функции $F(x_{ij})$ можно взять

$$F(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, j = 7, i = \{5, 9\}, \quad (6)$$

которая выражает потенциальные общие затраты на доставку и переработку грузов всеми ТЛЦ для всех узлов J .

Второй подход связан с тем, чтобы гарантировать величину максимального расстояния c_{ij} , которое присутствует в плане $\{x_{ij}\}$. Здесь план $\{x_{ij}\}$ будет выравнивать величины $\{x_{ij} c_{ij}\}$:

$$F(x_{ij}) = \max_{ij} \{x_{ij} c_{ij}\} \rightarrow \min.$$



$$X^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Пример решения задачи ($m=2, n=10$)

Fig. 2. Example of the problem solution ($m=2, n=10$)

То есть

$$F_{\text{опт}}(x_{ij}^*) = \min_{\{x_{ij}\}} \max_{(ij)} \{x_{ij} c_{ij}\} = F_0. \quad (7)$$

Известно, что такая целевая функция потребует более сложного метода решения. Поэтому воспользуемся следующим приемом. Объявим оптимальное значение F_0 искомой переменной, которая добавляется к имеющимся переменным x_{ij} . Таким образом, в задаче будет следующая совокупность переменных $\{F_0, x_{ij}\}$, т. е. всего их будет $n^2 + 1$.

Тогда в качестве новой целевой функции возьмем

$$F = F_0 \rightarrow \min. \quad (8)$$

С дополнительными выражениями:

$$x_{ij} c_{ij} \leq F_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Итак, в первом приближении задача выбора мест размещения ТЛЦ может быть записана в виде одной из двух задач математического программирования:

$$\text{I. } F(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\max}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \geq A_{\min}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (15)$$

$$\text{II. } F(x_{ij}) = F_0 \rightarrow \min; \quad (16)$$

$$x_{ij} c_{ij} \leq F_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}; \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n x_{ij} \right|_{0,1} = m; \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i x_{ij} \leq A_{\max}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n a_i x_{ij} \geq A_{\min}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (21)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}. \quad (22)$$

Заметим, что в вышеприведенной модели считается, что ТЛЦ находится в одном из узлов $i = \overline{1, n}$. Возникает вопрос: а что если ТЛЦ можно построить в месте, где нет узла? Это может быть выгодно, если затраты на создание инфраструктуры для нового ТЛЦ (нового узла) будут меньше, чем дополнительная выгода от его функционирования. Такое может быть, если новый узел находится между большими скоплениями узлов с большими a_i . Чтобы учесть это, можно дополнять исходное множество узлов J новыми виртуальными узлами, находящимися в некоторых замечательных с точки зрения геометрии точках, например это «центры тяжести» узлов [11].

Координаты дополнительного узла $i=0$ можно получить, зная координаты каждой i вершины (x_i, y_i) и объемы a_i , по формулам

$$x_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n a_i x_i; \quad (23)$$

$$y_0 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n a_i y_i; \quad (24)$$

$$V = \sum_{i=1}^n a_i, \quad (25)$$

где V — суммарный объем перерабатываемых грузов, т.

Получим множество узлов. При этом необходимо задать проекты новых участков дорог из нового узла в некоторые вершины j . После этого можно дополнить матрицы X и C дополнительными элементами x_{0j} , x_{j0} и c_{0j} , c_{j0} .

Решая рассмотренные задачи на новом множестве J^+ , получаем новый оптимальный план $\{x_{ij}^{*+}\}$. При этом если новые значения критерия F^{*+} будут меньше F^* , то принимаем новое решение.

Задачи I и II принадлежат к классу задач линейного булева программирования (ЛБП). Известно, что эта задача принадлежит к так называемым NP трудным задачам. Это означает, что сложность решения подобных задач растет быстрее, чем любой полином от количества переменных. У задачи I — количество переменных n^2 , количество строк ограничений $3n + 1$. У задачи II — $n^2 + 1$ переменных и $n^2 + 3n + 1$ строк ограничений.

Реальные расчеты необходимо делать для n порядка от 10 до 100 и более.

Для количества узлов $n = 10$ получаем:

- задачу I с 100 переменными и 31 ограничением;
- задачу II с 101 переменной и 131 ограничением.

Для $n = 100$ соответственно имеем:

- для задачи I — 10^4 переменных и 301 ограничение;
- для задачи II — 10^4 переменных и 10 301 ограничение.

Из изложенного ясно, что приведенные математические модели в принципе позволяют решать поставленную задачу на основе алгоритмов решения задач ЛБП для небольших регионов. Известны многочисленные алгоритмы и компьютерные программы, применяемые для решения таких задач [10, 12, 13]. Точные решения можно получить, например, на основе так называемого аддитивного алгоритма при числе ограничений $N < 10^2$ [14].

Приближенные решения можно получить на основе «генетического» алгоритма, исследование возможностей которого дано в работах [12, 15].

Определение оптимальных мест размещения ТЛЦ в рамках федеральных округов или страны в целом в виде задач математического программирования приводит попытки строгого решения к неконструктивным, так как требуются сложные комбинаторные ограничения, формирование большого массива переменных, а также переборные алгоритмы решения сверхбольшой размерности.

Результаты и обсуждение. Оценочный анализ рассмотренных математических методов определения оптимальных мест размещения ТЛЦ [1] представлен в таблице.

Таблица

Анализ математических методов нахождения оптимальных центров обслуживания

Table

Analysis of mathematical methods for finding optimal service centres

Постановка задачи	Решение
Создание одного центра	
1. Для заданных n точек найти один геометрический центр, сумма расстояний от которого до этих точек минимальна	Решение — точка Торичелли. Для $n \geq 5$ задача решается приближенно
2. Для заданных k точек найти центр, лежащий на заданной прямой, чтобы суммарное расстояние от центра до точек было минимальным	Решение нелинейного уравнения высокой степени приближенными методами
3. Для заданных n точек найти такую сеть дорог, чтобы общая длина дорог, соединяющая точки, была минимальной	Решение — сеть Штейнера. Для $n \geq 5$ задача решается приближенно (перебором вариантов)
Создание многих центров	
4. Задано n вершин графа, ребра — это пути, соединяющие вершины. Найти подмножество расстояний от вершин до центров (количество их k может быть задано или не задано), чтобы суммарная длина пути от вершин до своих центров была минимальной	Решение в виде задачи математического программирования на основе переборных алгоритмов типа ветвей и границ. Высокая сложность решения задач большой размерности
5. Задано n точек, найти центры, располагающиеся в любой точке области, чтобы суммарное расстояние от точек до своих центров было минимальным	Решение в виде задачи нелинейного программирования большой размерности. Высокая сложность вычислений даже при небольших n и k
6. Найти n произвольных точек, находящихся в любых точках области, и центры, располагающиеся в любой точке области, чтобы суммарное расстояние от точек до своих центров было минимальным	Решение в виде задачи нелинейного программирования сверхбольшой размерности

В рамках настоящей работы в качестве примера прикладной методики рассмотрим подход по выбору мест размещения ТЛЦ, использованный в Генеральной схеме развития сети ТЛЦ, разработанной в рамках реализации федерального проекта «Транспортно-логистические центры».

В соответствии с Генеральной схемой [16] процесс выбора площадки для размещения инфраструктуры ТЛЦ носит поэтапный характер и предполагает первоначально выбор региона, а затем площадки (конкретного земельного участка). Определение оптимальных мест размещения основывается на рейтинговой оценке по следующим критериям выбора регионов:

- численность населения региона;
- величина валовой добавленной стоимости региона (по обрабатывающей промышленности и сфере услуг);
- оборот розничной торговли;
- наличие крупных мультимодальных транспортных узлов на пересечении маршрутов международных транспортных коридоров, на грузонапряженных направлениях перевозок.

По результатам ранжирования были определены перспективные для размещения опорной сети инфраструктуры ТЛЦ регионы РФ.

Однако следует отметить, что представленный подход позволяет оценить лишь позицию регионов по шкале выбранных показателей, при этом не определяются количественные характеристики транспортно-логистической инфраструктуры (один регион — один ТЛЦ), не учитывается существующая топология магистральных транспортных путей, что, соответственно, приведет к необеспечению основного логистического принципа — минимизации затрат на перевозку грузов для ее участников. Кроме этого, при выборе регионов для размещения ТЛЦ не учитываются экономическая связанность регионов и текущее состояние рынка транспортно-логистических услуг: наличие схожих по функциональному назначению транспортно-логистических объектов; планов соседних регионов, других ведомств и иных операторов по их созданию. Указанный недостаток может привести к нарушению внутренних и международных кооперационных связей, необеспечению логистического принципа доставки «точно в срок».

Некоторые выбранные критерии не отвечают объективности в рамках поставленной задачи. Так, основу грузовой базы сети ТЛЦ составляют контейнеропригодные грузы, представляющие собой продукцию преимущественно несырьевых отраслей. В свою очередь, при сравнении показателей объема валового регионального продукта и оборота розничной торговли с контейнерным оборотом в отдельных регионах потенциального размещения ТЛЦ наблюдаются существенные различия (до 8 раз) между значениями приведенных показателей. Так, например, Республика Татарстан (пятое место в

рейтинге) по сравнению с Новосибирской областью (десятое место в рейтинге) при практически двукратном превышении экономических показателей имеет в 6 раз меньший контейнерный оборот. Очевидно, что оптимальный выбор потенциальных регионов для размещения опорной сети ТЛЦ должен был производиться относительно центров производства и потребления контейнеропригодной продукции, которая имеет большую удельную стоимость и к перевозке которой предъявляются более высокие требования по сравнению с продукцией сырьевых отраслей.

В работах [1, 9, 17, 18] представлен методологический подход, основанный на известных и развитых методах кластерного анализа, позволяющий решать оптимизационные задачи размещения объектов транспортно-логистической инфраструктуры очень большой размерности, в частности опорной сети узловых грузовых мультимодальных ТЛЦ, например, в рамках территорий федеральных округов или страны в целом. На основе классического метода кластеризации k-means разработан и обоснован новый метод кластеризации k-means pro, позволяющий решать задачу выбора оптимального места размещения ТЛЦ с проекцией на магистральную транспортную сеть. При этом применение единой методологии кластерного анализа обеспечивает возможность разбиения множества объектов на подмножества со своими центрами, обладающими оптимальными свойствами. Использование метрик близости точек моделирует минимизацию расстояний или затрат при перевозке, если в качестве «веса» каждой точки принять релевантные объемы грузоперевозок. Это позволяет определить количественные характеристики и мощность объектов опорной сети ТЛЦ, учитывая различные исходные параметры производства и потребления контейнеропригодной продукции, магистральных транспортных коммуникаций, существующих объектов транспортно-логистической инфраструктуры и взаимно увязывая их с разнообразными целевыми характеристиками. В разработанных моделях на основе методов кластерного анализа учтена универсальная возможность расширения пространства критериев.

Заключение. Проведенный оценочный анализ основных математических и практических методов определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов дает основу для выбора метода в качестве универсального для сетевого подхода к формированию инфраструктуры ТЛЦ в рамках региональных и федеральных проектов. По результатам исследования предложена научно обоснованная концепция системного подхода к вопросам рационального проектирования и размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры на основе комплексного использования известных и развитых методов кластерного анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Москвичев О.В. Методология организации функционирования контейнерно-транспортной системы на основе клиентоориентированности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. М., 2019. 417 с.

2. Протасов В.Ю. Максимумы и минимумы в геометрии. М.: Изд-во Моск. центра непрерыв. мат. образования, 2005. 56 с.

3. Ishfaq R., Sox C. R. Hub location – allocation in intermodal logistic networks // *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 210, issue 2. P. 213–230.

4. Lin C. C., Chiang Y. I., Lin S. W. Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem // *Computers and Operations Research*. 2014. Vol. 51. P. 41–54.

5. Abbassi A., Hilali Alaoui A. E., Boukachour J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach // *Journal of Computational Science*. 2019. Vol. 30. P. 127.

6. Lin C. C., Lin S. W. Two-stage approach to the intermodal terminal location problem // *Computers and Operations Research*. 2016. Vol. 67. P. 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>.

7. Kumar A., Anbanandam R. Location selection of multimodal freight terminal under STEEP sustainability // *Research in Transportation Business and Management*. 2019. Vol. 33. P. 33.

8. Brandeau M. L., Chin S. S. An overview of representative problems in location research // *Management Science*. 1989. Vol. 35, no. 6. P. 645–674.

9. Москвичев О.В. Клиентоориентированная контейнерная транспортная система. М.: ВИНТИ РАН, 2018. 186 с.

10. Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования // *Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2*. 2000. Т. 7, № 2. С. 22–46.

11. Кириллова А.Г. Методология организации контейнерных и контройлерных перевозок в мультимодальных автомобильно-железнодорожных сообщениях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. М., 2010. 47 с.

12. Есипов Б.А. Исследование алгоритмов решения обобщенной задачи о минимальном покрытии // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. № 4 (2). С. 308–312.

13. Есипов Б.А. Методы исследования операций: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2013. 304 с.

14. Кузнецов А.В., Сакович В.А., Холод Н.И. Высшая математика. Математическое программирование: учеб. / под общ. ред. А.В. Кузнецова. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010. 352 с.

15. Нгуен М.Х. Применение генетического алгоритма для задачи нахождения покрытия множества // *Труды Института системного анализа Российской академии наук*. 2008. № 33. С. 206–219.

16. Генеральная схема развития сети транспортно-логистических центров (ТЛЦ) / Министерство транспорта Российской Федерации, ФКУ «Ространсmodernизация». М., 2019. 49 с.

17. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods // *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019 (Moscow, 20–22 November 2019)*. Moscow: EDP Sciences, 2020. P. 03008.

18. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 54. P. 461–469.

REFERENCES

1. Moskvichev O. V. Metodologiya organizatsii funktsionirovaniya konteynerno-transportnoy sistemy na osnove klientoorientirovannosti [Methodology for organizing the functioning of a container-transport customer-oriented system]. Dr. of Sci. thesis: 05.22.01. Moscow; 2019. 417 p. (In. Russ.).

2. Protasov V. Yu. Maksimumy i minimumy v geometrii [Maxima and Minima in Geometry]. Moscow: Moscow Centre of Cont. Math. Ed. Publ.; 2005. 56 p. (In. Russ.).

3. Ishfaq R., Sox C. R. Hub location – allocation in intermodal logistic networks. *European Journal of Operational Research*. 2011; 210(2):213–230.

4. Lin C. C., Chiang Y. I., Lin S. W. Efficient model and heuristic for the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*. 2014;(51):41–54.

5. Abbassi A., Hilali Alaoui A. E., Boukachour J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach. *Journal of Computational Science*. 2019;(30):127.

6. Lin C. C., Lin S. W. Two-stage approach to the intermodal terminal location problem. *Computers and Operations Research*. 2016;(67):113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.09.009>.

7. Kumar A., Anbanandam R. Location selection of multimodal freight terminal under STEEP sustainability. *Research in Transportation Business and Management*. 2019;(33):33.

8. Brandeau M. L., Chin S. S. An overview of representative problems in location research. *Management Science*. 1989;35(6):645–674.

9. Moskvichev O. V. Klientoorientirovannaya konteynernaya transportnaya sistema [Client-oriented container transport system]. Moscow: VINITI RAN Publ.; 2018. 186 p. (In. Russ.).

10. Eremeev A. V., Zaozerskaya L. A., Kolokolov A. A. Zadacha o pokrytii mnozhestva: slozhnost', algoritmy, eksperimental'nye issledovaniya [Set Covering Problem: Complexity, Algorithms, Experimental Investigations]. *Diskretnyy analiz i issledovanie operatsiy. Seriya 2 = Discrete Analysis and Operations Research. Series 2*. 2000;7(2):22–46. (In. Russ.).

11. Kirillova A. G. Metodologiya organizatsii konteynernykh i kontreylernykh perevozok v mul'timodal'nykh avtomobil'no-zheleznodorozhnykh soobshcheniyakh [Methodology for organizing container and piggyback transportation in multimodal road and rail communications]. Dr. of Sci. thesis synopsis: 05.22.01. Moscow; 2010. 47 p. (In. Russ.).

12. Esipov B. A. Issledovanie algoritmov resheniya obobshchennoy zadachi o minimal'nom pokrytii [Investigation of algorithms for solving the generalized minimum coverage problem]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestia RAS SamSC)*. 2014;4(2):308–312. (In. Russ.).

13. Esipov B. A. Metody issledovaniya operatsiy [Operations research methods]. Textbook. 2nd ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2013. 304 p. (In. Russ.).

14. Kuznetsov A. V., Sakovich V. A., Kholod N. I. Vysshaya matematika. Matematicheskoe programmirovaniye [Higher Mathematics. Mathematical programming]. Textbook. 3rd ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2010. 352 p. (In. Russ.).

15. Nguen M. Kh. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya zadachi nakhozheniya pokrytiya mnozhestva [Application of a genetic algorithm for the problem of finding a set cover]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*. 2008;(33):206–219. (In. Russ.).

16. General'naya skhema razvitiya seti transportno-logisticheskikh tsentrov (TLTs) [General scheme for the development of a network of transport and logistics centres (TLC)]. Ministry of Transport of the Russian Federation. Moscow: Rostransmodernizatsiya Publ.; 2019. 49 p. (In. Russ.).

17. Moskvichev O., Nikishchenkov S., Moskvicheva E. Optimization of production and transport infrastructure based on cluster analysis methods. *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019 (Moscow, November 20–22, 2019)*. Moscow: EDP Sciences; 2020. P. 03008.

18. Moskvichev O., Moskvicheva E., Bulatov A. Clustering Methods for Determination of Optimal Locations of Container Storage and Distribution Centers. *Transportation Research Procedia*. 2021;(54):461–469.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой», Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы», Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), Author ID: 498417, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg V. MOSKVICHEV,

Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Operations Management Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Svobody St.), Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Elena E. MOSKVICHEVA,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Freight and Commercial Work Technologies, Stations and Junctions, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Svobody St.), Author ID: 498417, <https://orcid.org/0000-0002-4729-7695>

ВКЛАД АВТОРОВ

Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ. Систематизация и анализ существующих математических моделей и методов оптимизации размещения терминально-логистических объектов транспортной системы, выбор и обоснование корректности предлагаемых подходов и методов. Разработка методологического подхода, основанного на известных и развитых методах кластерного анализа, позволяющего решать оптимизационные задачи размещения объектов транспортно-логистической инфраструктуры очень большой размерности (80%).

Елена Евгеньевна МОСКВИЧЕВА. Анализ основных отечественных и зарубежных работ, относящихся к тематике настоящего исследования; систематизация и обобщение практических решений определения оптимальных мест размещения транспортно-логистических объектов (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Oleg V. MOSKVICHEV. Systematisation and analysis of existing mathematical models and methods for optimising the placement of terminal and logistics facilities of the transport system, selection and justification of the correctness of the proposed approaches and methods. Development of a methodological approach based on well-known and developed methods of cluster analysis, which allows solving optimisation problems of locating objects of transport and logistics infrastructure of a very large scale (80%).

Elena E. MOSKVICHEVA. Analysis of the main scientific works related to the subject of this study; systematisation and generalisation of practical solutions for determining the optimal locations for transport and logistics facilities (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22.03.2022, первая рецензия получена 24.03.2022, вторая рецензия получена 05.04.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 22.03.2022, first review received 24.03.2022, second review received 05.04.2022, accepted for publication 29.08.2022.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. — Москва : АО «ВНИИЖТ», 2021. — 456 с.

Рассмотрены базовые аспекты, связанные с созданием и эксплуатацией грузовых вагонов. Приведены общие соображения, касающиеся способов повышения провозной способности железных дорог, производительности перевозочного процесса. Представлен пример обзора конструкций грузовых вагонов. Даны методические основы анализа и испытаний, проводимых с целью выяснения эксплуатационного ресурса по усталостной долговечности грузовых вагонов и их компонентов. Приведены экономические соображения, касающиеся применения затрат жизненного цикла для определения суммарной стоимости владения вагоном до конца срока службы. Кратко описаны современные методы компьютерного

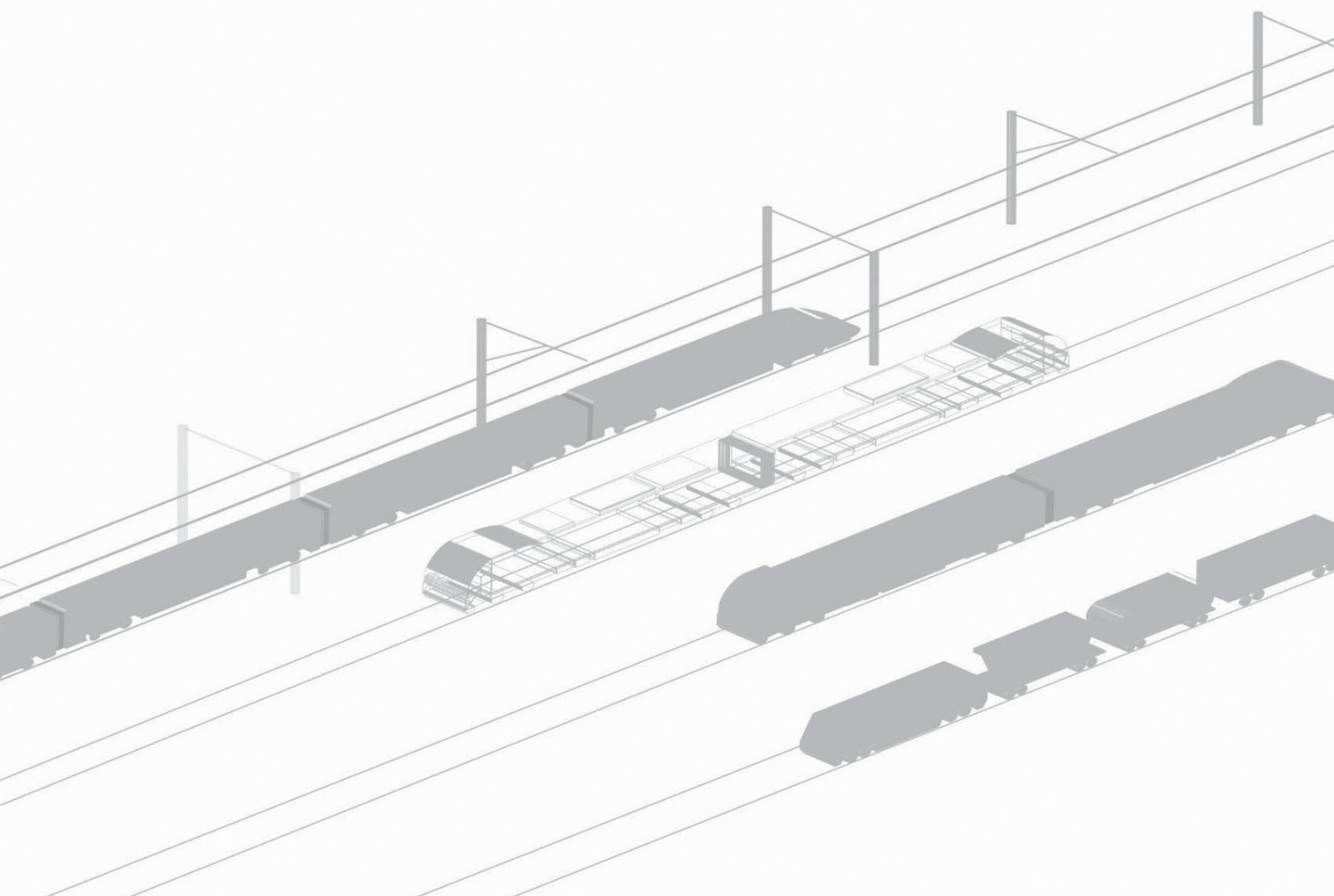
моделирования усталостных проявлений в контактах качения и процедуры испытаний. Освещается передовой опыт контроля технического состояния, технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Рассмотрены мероприятия технического обслуживания и ремонта и особенности нормативно-правового регулирования технической эксплуатации грузовых вагонов разных стран. Описаны средства мониторинга технического состояния грузовых вагонов и поездов непосредственно в процессе движения. Приведена информация о ряде полезных систем мониторинга.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами железнодорожного транспорта, и студентов, изучающих данные проблемы.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА





ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Исторический очерк

УДК 002.6.048.26

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-278-285

EDN: <https://elibrary.ru/dnuixz>



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ КОЛЬЦУ АО «ВНИИЖТ» – 90 ЛЕТ

В. Н. Каплин✉, О. Н. Римская

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В 2022 г. главному испытательному центру российских железных дорог — Экспериментальному кольцу АО «ВНИИЖТ» — исполняется 90 лет.

Накопленный Экспериментальным кольцом опыт является уникальным в глобальном масштабе: на момент своего создания оно было первым в мире специально выделенным полигоном для испытания новейших образцов железнодорожной техники и материалов.

Вклад Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» в развитие советских и российских железных дорог трудно переоценить. Специально подготовленный полигон и высокопрофессиональный персонал, оснащенный всем необходимым оборудованием, позволили кардинально ускорить разработку новых железнодорожных технологий и их внедрение в процесс перевозок. Репутация и значение Экспериментального кольца подтверждается постоянным вниманием и визитами первых лиц государства и руководителей отрасли.

В представленном историческом очерке показаны основные этапы развития Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ», а также его значение как для транспортной отрасли нашей страны, так и для отечественной железнодорожной науки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальное кольцо, ВНИИЖТ, железная дорога, испытательный полигон, лаборатория

Для цитирования: Каплин В. Н., Римская О. Н. Экспериментальному кольцу АО «ВНИИЖТ» — 90 лет // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 278–285. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-278-285>.



VNIIZHT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

Historical essay

UDK 002.6.048.26

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-3-278-285

EDN: <https://elibrary.ru/dnuixz>



THE EXPERIMENTAL LOOP OF RAILWAY RESEARCH INSTITUTE CELEBRATES ITS 90TH ANNIVERSARY

Valeriy N. Kaplin✉, Ol'ga N. Rimskaya

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

In 2022, the main testing centre of Russian railways, the Experimental Loop of the Railway Research Institute, turns 90 years old.

The experience accumulated by the Experimental Loop is unique at a global scale: at the time of its creation, it was the world's first designated testing area for the latest models of railway vehicles and materials.

The contribution of the Experimental Loop to the development of Soviet and Russian railways cannot be overestimated. A specially built proving ground and highly professional staff equipped with all the necessary tools made it possible to radically accelerate the development of new railway technologies and their implementation in the transportation process. The reputation and importance of the Experimental Loop is confirmed by the constant attention and visits of top state officials and industry leaders.

The presented historical essay shows the main stages in the development of the Experimental Loop, as well as its significance both for the transport industry of our country and for Russian railway science.

KEYWORDS: Experimental Loop, Railway Research Institute, railway, testing area, laboratory

For citation: Kaplin V. N., Rimskaya O. N. The Experimental Loop of Railway Research Institute celebrates its 90th Anniversary. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):278-285. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-278-285>.

Введение. Перевозочная деятельность железных дорог России и структурные изменения в железнодорожной отрасли отразили в себе социально-экономические перемены исторически важного периода страны. Накануне Октябрьской революции железные дороги России находились в чрезвычайно расстроенном состоянии. Империалистическая и гражданская войны сильно подорвали работоспособность сети, многие железные дороги и туннели были разрушены. От разрухи послевоенных лет железные дороги вступили в полосу коренной переделки своей инфраструктуры. Количественная и качественная перестройка аппарата железных дорог на базе новейших достижений современной техники стала возможной в условиях последовательного развития всей железнодорожной системы страны. Развитие сети железных дорог Советского Союза и увеличение объемов перевозок сопровождались интенсивным расширением парка подвижного состава и строительством новых железнодорожных путей, что, в свою очередь, делало необходимым создание железнодорожных испытательных полигонов для новейших образцов техники. В свете этих событий большое значение имела постройка первого в мировой практике опытного кольца, создавшего новые возможности для исследования характеристик локомотивов и вагонного парка, а также точности их определения при постоянстве заданного режима работы.

Исторические вехи развития испытаний на железнодорожном транспорте. Идея создания специального полигона для проведения исследований параметров паровой тяги принадлежит проф. Ю. В. Ломоносову [1]. Еще в 1901 г. он выдвинул идею о необходимости специального замкнутого пути на горизонтальной площадке для изучения тяговых характеристик паровозов. Эта идея начала реализовываться после создания в 1918 г. в Москве Экспериментального института путей сообщения, основной задачей которого стало исследование проблем эксплуатации железнодорожного подвижного состава с целью его дальнейшего совершенствования. Для реализации поставленных практических задач было принято решение о строительстве замкнутого железнодорожного пути в форме окружности на площадке без уклонов. После обсуждения возможных вариантов Народному комиссариату путей сообщения был выделен под строительство участок вблизи платформы Щербинка Московско-Курской железной дороги.

Строительство экспериментального пути было начато в 1928 г. Руководителем строительства был назначен старший инженер, впоследствии д-р техн. наук, проф. Н. И. Белоконов (фото 1).

За сравнительно короткое время был построен однопутный кольцевой путь длиной 6 км с единым радиусом кривой 956 м, с нулевым уклоном, кроме того,

параллельно строились тяговая подстанция, здания локомотивного депо, мастерские и лабораторные помещения. Комплекс строительных работ был закончен в 1932 г. (фото 2).

Итогом проведенных мероприятий стало создание первого в мире испытательного полигона железнодорожной техники — Экспериментального кольца НИИЖТ НКПС (в настоящее время — Экспериментальное кольцо АО «ВНИИЖТ») [2, 3]. Современный полигон включает в себя исследовательские лаборатории, три электрифицированных кольцевых пути и пост электрической централизации, в котором располагается комплекс технических средств для управления движением поездов [4]. Он предназначен для проведения комплексных испытаний локомотивов, моторвагонного подвижного состава, вагонов, конструкций и элементов верхнего строения пути, оборудования контактной сети.

Развитие всех отраслей народного хозяйства и непрерывный рост грузооборота в нашей стране требовали решительного обновления вагонного парка и массовой постройки большегрузных вагонов. Начало 1930-х гг. знаменует собой качественный скачок строительства нового четырехосного подвижного состава — крытых вагонов, гондол, хопперов, платформ, цистерн грузоподъемностью 50–60 т. Экспериментальное кольцо стало основным полигоном для отработки конструкций новых вагонов, разработки и проверки нормативов безопасности и торможения [5]. Железнодорожный транспорт во всех странах к тому времени не знал примеров массового перевода подвижного состава на автосцепку с винтовой упряжи. На Экспериментальном кольце испытательные работы были выполнены в короткие сроки, и с 1935 г. принято решение о внедрении на сети железных дорог автосцепки СА-3.

Первым объектом испытаний на Экспериментальном кольце стал паровоз Э*710-53. В 1932 г. под руководством проф. О. Н. Исаакяна успешно прошли его испытания. В 1933 г. под руководством канд. техн. наук Т. Н. Хохлова прошли испытания первого магистрального тепловоза Э^{эл}14, предназначенного для серийного выпуска. В 1935 г. Экспериментальное кольцо было электрифицировано. В этом году под руководством проф. В. Ф. Егорченко были проведены испытания первых электровозов постоянного тока ВЛ19-17 и С11-18. В 1939–1940 гг. на Экспериментальном кольце был успешно проведен комплекс испытаний первого отечественного электровоза переменного тока ОР 22-01. Руководили испытаниями инженеры В. А. Забродин и Е. Г. Луценко.

В 1940-х гг. на кольце был выполнен большой объем исследований в области электротяги на переменном токе для разработки новых локомотивов. Впоследствии на полигоне прошли испытания все серийные

электропоезда однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. На основании проведенных исследований были созданы самые мощные на тот период грузовые электропоезда переменного тока ВЛ-80^с с реостатным и ВЛ80^р с рекуперативным торможением. В послевоенные годы объем проводимых исследований на кольце значительно вырос. Основной задачей являлось увеличение объема перевозимых грузов для восстановления разрушенных объектов народного хозяйства. В 1955 г. прошли испытания паровоза П38-001 сочлененного типа мощностью 3800 л. с. В 1958 г. были проведены исследования продольных сил при вождении тяжеловесных грузовых составов массой 8000 т.

В связи с развитием железнодорожного транспорта в России значительно увеличился объем испытаний, проводимых на Экспериментальном кольце. Для реализации разноплановых проектов научных исследований одного кольца стало недостаточно. Поэтому МПС было принято решение о строительстве дополнительных путей. В 1960 г. внутри существующего 1-го кольцевого пути были построены два замкнутых пути (2-й и 3-й) длиной 5700 м переменного профиля, имеющие кривые радиусы от 490 до 1200 м, прямые вставки с подъемами и спусками до 12 %. Построенные пути предназначались для проведения комплексных испытаний конструкций верхнего строения пути и грузовых полувагонов.

В 1967 г. были проведены работы по усилению верхнего строения пути на 1-м кольцевом пути для эксплуатации тяжеловесных составов и увеличения скоростей движения. В рамках модернизации уложе-

Фото 1. Белоконов Николай Иванович, выдающийся ученый в области термодинамики, теплотехники, энергетики железнодорожного транспорта и транспорта нефти и газа, д-р техн. наук, профессор (1899–1970)

Photo 1. Nikolay I. Belokon', an outstanding scientist in the field of thermodynamics, heat engineering, railway transport energetics and transportation of oil and gas, Dr. of Sci. (Engineering), Professor (1899–1970)



ны более тяжелые рельсы типа Р65, возвышение на-
ружного рельса установлено до миллиметра.

В 1969–1970 гг. на Экспериментальном кольце были проведены комплексные исследования продольной динамики поезда массой до 15 000 т, сформированного из грузовых вагонов разных конструкций с увеличенной нагрузкой на ось.

В 1971 г. закончено строительство корпуса, где разместились испытательные лаборатории: лаборатория сварки, лаборатория дефектоскопии, стенды для испытания конструкций на прочность. В этом же году завершились работы по модернизации тяговой подстанции и электрификации 2-го и 3-го кольцевого пути.

В 1977 г. была построена уникальная мостовая эстакада длиной 250 м, на которой можно было



Фото 2. Строители Экспериментального кольца, 1932 г.

Photo 2. The Experimental Loop builders, 1932



Фото 3. Президент России В. В. Путин и ведущий научный сотрудник лаборатории «Электропоезда» АО «ВНИИЖТ» Н. Н. Широченко на испытаниях новейшего электропоезда «Ермак», Экспериментальное кольцо, 2005 г.

Photo 3. President of Russia V. V. Putin and N. N. Shirochenko, a leading researcher at the Electric Locomotives Laboratory of Railway Research Institute, during testing of the newest electric locomotive Yermak, Experimental Loop, 2005



Фото 4. Испытания скоростного поезда «Аллегро» компании «Альстом» на Экспериментальном кольце

Photo 4. Testing of the Allegro high-speed train of the Alstom company on the Experimental Loop

проводить испытания пролетных строений как из металла, так и железобетона.

В 1987 г. завершено строительство здания, в котором была смонтирована автоматическая система управления электрической централизацией стрелочных переводов и светофоров (АСУ ЭЦ).

В 1990–1992 гг. на испытательном полигоне проводились испытания самого мощного на тот период пассажирского тепловоза ТЭП80 мощностью 6000 л.с. В 1993 г. на нем был установлен мировой рекорд скорости для тепловозов — 271 км/ч.

В период с 1994 по 2000 г. на Экспериментальном кольце были проведены испытания электропоезда ЭП10

с асинхронным тяговым двигателем и скоростного пассажирского электропоезда переменного тока ЭП200 с вентильным тяговым электродвигателем.

В 2001 г. проходили испытания построенного в России высокоскоростного электропоезда двойного питания ЭС250-01 «Сокол».

После создания в 2003 г. компании ОАО «РЖД» объем испытаний на Экспериментальном кольце значительно увеличился, также была намечена дальнейшая модернизация инфраструктуры и лабораторного оборудования. В 2005 г. Экспериментальное кольцо посетил президент России В. В. Путин. Он совершил поездку на электропоезде 2ЭС5К «Ермак» (фото 3), первом электропоезде переменного тока, созданном в России и проходящем сертификационные испытания.

С 2007 г. на испытательном полигоне прошли испытания и были введены в эксплуатацию новые грузовые электропоезда постоянного тока: 2ЭС6, 2ЭС10, переменного тока 2ЭС7, КЗ8А, 2ЭС5. В 2009 г. на Экспериментальном кольце было организовано проведение испытаний высокоскоростного электропоезда Velaro RUS «Сапсан» со скоростями до 140 км/ч. В ходе дальнейших сертификационных испытаний на Октябрьской железной дороге были проведены опытные поездки со скоростями до 270 км/ч.

В 2011 г. на Экспериментальном кольце была проведена опытная поездка газотурбовоза ГТ1 с грузовым составом массой 16 000 т, оборудованного системой управления тормозами, что является абсолютным рекордом для локомотивов автономной тяги с одной силовой установкой. Это достижение занесено в книгу рекордов Гинесса.

В период 2010–2014 гг. на испытательном полигоне прошли испытания скоростного поезда «Аллегро» (фото 4), построенного компанией «Альстом», который эксплуатируется на линии Санкт-Петербург — Хельсинки, и электропоезда «Ласточка» (проект Desiro RUS), который успешно эксплуатировался при перевозках пассажиров во время проведения Зимних Олимпийских игр 2014 г. в Сочи.

В 2015 г. в рамках реализации проекта интермодальных перевозок на Экспериментальном кольце прошли испытания двухэтажного пассажирского электропоезда ЭШ2 (KISS RUS), который эксплуатируется в настоящее время на линиях, соединяющих железнодорожные вокзалы с аэропортами.

За время функционирования испытательного полигона на нем проведены испытания более 200 опытных объектов подвижного состава. В процессе проводимых исследований проверялись тягово-энергетические характеристики локомотивов, оценивалась прочность и надежность новых деталей, узлов тягового подвижного состава. Прошли испы-

тания более 200 партий опытных рельсов как отечественных, так и ведущих мировых производителей из Японии, Канады, Австрии. На Экспериментальном кольце проводились исследования взаимодействия пути и подвижного состава (колесо — рельс), влияния повышения осевых нагрузок на возникновение и развитие контактно-усталостных дефектов в рельсах, влияния увеличения грузоподъемности на эксплуатационные характеристики узлов и деталей грузовых полувагонов и состояние пути.

Большой вклад в стабильное функционирование испытательного полигона, организацию технического сопровождения научно-исследовательских работ и проведение испытаний внесли руководители Экспериментального кольца. В разные годы коллектив кольца возглавляли А. П. Егоров, Н. Г. Пустовойт, В. И. Козловский, Г. А. Ильященко, А. А. Ерёмускин, В. Н. Каплин, а с 2021 г. начальником Экспериментального кольца является В. С. Баторин.

В настоящее время Экспериментальное кольцо остается основным полигоном для проведения научно-исследовательских работ и комплексных испытаний железнодорожного состава и конструкций верхнего строения пути. Продолжаются системные исследования электромагнитного взаимодействия электроподвижного состава нового поколения и тяговой сети, систем сигнализации, централизации и блокировки и автоматической локомотивной сигнализации, работы по улучшению качества электрооборудования. На полигоне проводятся испытания новых инновационных грузовых и пассажирских вагонов для проверки их динамических и прочностных характеристик. Испытательный полигон задействован для реализации значимых для ОАО «РЖД» проектов, направленных на улучшение качества обслуживания пассажиров в Московском регионе. В 2015–2016 гг. в рамках реализации проекта «Московское окружное кольцо» (МЦК) на Экспериментальном кольце прошли испытания электропоездов ЭС2Г «Ласточка».

В 2018–2019 гг. для реализации проекта «Московские центральные диаметры» (МЦД) на кольце проведены сертификационные испытания электропоезда ЭГ2Тв «Иволга» (ОАО «ТВЗ»), который успешно эксплуатируется на маршрутах МЦД-1 и МЦД-2.

В 2019 г. на Экспериментальном кольце были успешно проведены испытания новых электропоездов 2ЭС5С и 3ЭС5С переменного тока (ООО ПК «НЭВЗ») с первым российским асинхронным приводом. Продолжаются сертификационные испытания опытных партий рельсов до 150 млн т брутто, после чего будет проводиться их подконтрольная эксплуатация.

В рамках реализации проекта высокоскоростной железнодорожной магистрали на Эксперименталь-

ном кольце продолжают испытания безбалластной конструкции пути АО «РЖДСтрой». Пропущенный тоннаж составляет более 400 млн т брутто. Планируется укладка высокоскоростного стрелочного перевода на безбалластной основе.

В рамках внедрения инновационных технологий ведутся исследования по проверке прочности и долговечности элементов верхнего строения пути (шпал, накладок), изготовленных из композиционных материалов. В 2020 г. на Экспериментальном кольце начаты испытания мостового пролетного строения из композитных материалов ООО НПП «АпАТЭК».

В 2019–2021 гг. на Экспериментальном кольце был проведен комплекс испытаний электропоезда ЭС2Г «Ласточка», оборудованного беспилотной системой управления. Целью проводимых испытаний является разработка программы, позволяющей осуществлять управление электропоездом без машиниста, автоматизированно двигаясь по маршруту, своевременно останавливаясь на платформах, осуществляя посадку и высадку пассажиров.

В 2022 г. на кольце проходят сертификационные испытания грузового электровоза нового поколения 2ЭС8 «Малахит» (ООО «Уральские локомотивы»). Электровоз оборудован асинхронным тяговым двигателем отечественного производства с возможностью поосного регулирования силы тяги. Электровоз был разработан и построен в рамках реализации программы импортозамещения. Проводятся научно-исследовательские работы по разработке конструкции и технологий содержания железнодорожного пути до наработки 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа.

Выставочная деятельность на Экспериментальном кольце. В 1970 г. МПС было принято решение сделать Экспериментальное кольцо площадкой для проведения международных выставок и конференций (фото 5).

В 1971 г. на территории кольца с успехом прошла первая международная выставка «Подвижной состав—71». Впоследствии были проведены международные выставки «Железнодорожный транспорт—77», «Железнодорожный транспорт—86» и «Железнодорожный транспорт—89», которые посетили тысячи советских и иностранных ученых и специалистов, связанных с производством и эксплуатацией железнодорожного подвижного состава. Во время работы выставок заключались взаимовыгодные торговые договоры, происходил обмен опытом в области развития железнодорожного транспорта.

В 2002 г. на полигоне успешно прошла международная конференция «Экспериментальное кольцо—70», в 2003 г. — научно-практическая конференция «Колесо — рельс».



Фото 5. Выставки на Экспериментальном кольце:

a — выставка «Желдортранс», 1986 г.; *б* — выставка «Подвижной состав», 1971 г., центральный вход

Photo 5. Exhibitions on the Experimental Loop:

a — Zheldortrans exhibition, 1986; *b* — Rolling Stock exhibition, 1971, main entrance

С 2007 г. решением ОАО «РЖД» раз в два года на площадке Экспериментального кольца проводится Международный салон техники и технологий «Экспо 1520», направленный на создание благоприятных условий взаимовыгодного сотрудничества производителей техники и технологий.

В 2011 г. впервые в рамках международного салона был проведен динамический показ ретро и современных локомотивов с участием грузовых и пассажирских паровозов.

В 2021 г. на территории Экспериментального кольца успешно прошел юбилейный международный салон пространства 1520 «PRO//Движение Экспо», который посетило более 30 000 человек. Даже краткий обзор работ, проведенных на испытательном полигоне, показывает его значимость в развитии технических средств железнодорожного транспорта России. Роль Экспериментального кольца по-прежнему важна для решения актуальных проблем, стоящих перед железнодорожным транспортом [6, 7].

Заключение. Сегодня модернизация железнодорожных магистралей и развитие железнодорожной инфраструктуры входит в число российских национальных приоритетов. В 2019 г. был запущен национальный проект «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры» для достижения национальной цели развития Российской Федерации — «достойный, эффективный труд и успешное предпринимательство».

За годы существования Экспериментального кольца в области исследования локомотивов и моторвагонного подвижного состава были проведены мно-

гочисленные экспериментальные и теоретические работы в следующих основных направлениях:

- изучение тяговых свойств локомотивов и работы силовых установок и вспомогательного силового оборудования, разработка нормативов по эксплуатации;
- исследование динамических, прочностных и ходовых свойств локомотивов, вопросов безопасности движения, повышения надежности основных узлов локомотивов и подвижного состава.

В перспективе железные дороги России должны стать основой для изменения конфигурации глобальных транспортных потоков и формирования новых международных транспортных коридоров. В этом процессе испытательные полигоны необходимы для проведения разносторонних научно-исследовательских работ и разработки на их базе новых эффективных решений по развитию технических средств железнодорожного транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Развитие науки и техники на железнодорожном транспорте: [сб. ст.] / [под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Д. Каретникова]. М.: Транспорт, 1968. 232 с. (Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. ЦНИИ МПС пятьдесят лет; вып. 360).
2. Фурьянский Н.А., Долганов А.Н. Опытное кольцо Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1977. 88 с.
3. Экспериментальное кольцо ВНИИЖТа — полигон создания новой техники и пропаганды научно-технических достижений СЖД. М.: ЦНИИТЭИ МПС, 1986. 12 с.
4. Экспериментальное кольцо — основная база испытаний и совершенствования вагонов / А.А. Долматов [и др.] // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1982. № 7. С. 12–15.

5. Железнодорожная наука: итоги I Международной научно-практической конференции «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт» / А.Б. Косарев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 5. С. 301–314. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-301-314>.

6. Виноградов С.А., Попов К.М. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 42–45.

7. Патент № 2297353 Российская Федерация, МПК B61L 27/00. Способ имитационного моделирования поездопотока по участку железной дороги: № 2005127976/11: заявл. 08.09.2005: опубл. 20.04.2007 / Мугинштейн Л.А. [и др.]. 11 с.

REFERENCES

1. Karetnikov A.D., ed. *Razvitie nauki i tekhniki na zheleznodorozhnom transporte* [The development of science and technology in railway transport]. Moscow: Transport Publ.; 1968. 232 p. (Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. TsNII MPS pyat'desyat let [Proceedings of the All-Union Railway Research Institute. Central Research Institute of the Ministry of Railways for fifty years]; no. 360). (In Russ.).

2. Fufryanskiy N.A., Dolganov A.N. Opytnoe kol'tso Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Experimental Loop of the All-Union Railway Research Institute]. Moscow: Transport Publ.; 1977. 88 p. (In Russ.).

3. Eksperimental'noe kol'tso VNIIZhTa — poligon sozdaniya novoy tekhniki i propagandy nauchno-tekhnicheskikh dostizheniy SZhD [Railway Research Institute Experimental Loop, a testing ground for the creation of new technology and the promotion of scientific and technological achievements of the Soviet Railways]. Moscow: TsNIITEI MPS Publ.; 1986. 12 p. (In Russ.).

4. Dolmatov A.A., Kitaev B.N., Kolomiychenko V.V., Tsyurenko V.N. Eksperimental'noe kol'tso — osnovnaya baza ispytaniy i sovershenstvovaniya vagonov [Experimental Loop, the main base for testing and improving railway cars]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science*. 1982;(7):12–15. (In Russ.).

5. Kosarev A.B., Rimskaya O.N., Anokhov I.V., et al. Zheleznodorozhnaya nauka: itogi I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont” [Railway Science: Results of the I International Scientific and Practical Conference “Research 1520 VNIIZHT: Look Beyond the Horizons”]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science*. 2021;80(5):301–314. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-301-314>. (In Russ.).

6. Vinogradov S.A., Popov K.M. Tsifrovye tekhnologii povysheniya energeticheskoy effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozk [Digital technologies for improving the energy efficiency of railway transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2019;(7):42–45. (In Russ.).

7. Muginshteyn L.A., Anfingenov A.Yu., Kiryakin V.Yu., et al. Patent No. 2297353 Russian Federation, MPK B61L 27/00. Sposob imitatsionnogo modelirovaniya poezdopotoka po uchastku zheleznoy dorogi [The method of simulation of train traffic on the section of the railway]: No. 2005127976/11: appl. 08.09.2005: publ. 20.04.2007. 11 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валерий Николаевич КАПЛИН,

заместитель начальника Экспериментального кольца, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 898539, <https://orcid.org/0000-0002-0865-2076>

Ольга Николаевна РИМСКАЯ,

канд. экон. наук, доцент, руководитель научно-образовательного комплекса, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valeriy N. KAPLIN,

Deputy Head of the Experimental Loop, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 898539, <https://orcid.org/0000-0002-0865-2076>

Ol'ga N. RIMSKAYA,

Cand. of Sci. (Economy), Associate Professor, Head of the Scientific and Educational Complex, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

ВКЛАД АВТОРОВ

Валерий Николаевич КАПЛИН. Обзор основных направлений исследования, подготовка содержательной части, иллюстраций и выводов (65%).

Ольга Николаевна РИМСКАЯ. Сбор и структурирование материалов, подготовка содержательной части и иллюстраций (35%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valeriy N. KAPLIN. Review of the main directions of the research, preparation of the content, illustrations and conclusions (65%).

Ol'ga N. RIMSKAYA. Collection and structuring of materials, preparation of content and illustrations (35%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022, рецензия получена 28.07.2022, принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 13.07.2022, review received 28.07.2022, accepted for publication 29.08.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Научный журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные и обзорные статьи, соответствующие тематике журнала. Не допускается направление в редакцию ранее опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).

При подготовке статьи к публикации в журнале необходимо учитывать следующие требования к ее структуре:

1. Указать УДК (слева в верхнем углу).

2. Заголовок статьи. Должен кратко (не более 12 слов) и информативно отражать содержание статьи. Приводится на русском и английском языках.

3. Инициалы и фамилии авторов, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название организации, индекс, страна, город, адрес, e-mail).

4. Аннотация (200–250 слов). Выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- Введение (основная тема, объект и цель исследования).
- Материалы и методы.
- Результаты исследования.
- Обсуждение и заключение (общие выводы, область применения).

5. Ключевые слова (5–8 слов или коротких словосочетаний). Должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

6. Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью; организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основной текст статьи.

8. Список источников (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов. Желательно использовать 10–15 источников на русском и английском языках.

9. Информация об авторах должна включать:

- фамилию, имя, отчество (полностью);
- место работы и адрес: индекс, город, улицу, дом;
- должность;
- адрес организации, ведомства (через запятую): индекс, город, улицу, дом;
- электронную почту;
- номер телефона;
- научные идентификаторы авторов (Author ID, ORCID).

10. Вклад авторов. В конце статьи разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу.

Техническое оформление

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx. Набор текста осуществляется с использованием шрифта Times New Roman, кегль 14 и межстрочный интервал 1,5. Формат листа — А4, поля — 20 мм.

2) Формулы следует набирать в редакторе MS Word Equation Editor или Math Type. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках.

3) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

4) Таблицы должны располагаться в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей. Публикация статей осуществляется на бесплатной основе.

Журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» предоставляет **открытый доступ** к своему контенту, исходя из следующего принципа: свободный открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями. Политика открытого доступа соответствует определению Будапештской инициативы открытого доступа (BOAI).

AUTHOR GUIDELINES

The **Russian Railway Science Journal** only publishes original scientific and review articles that correspond to the subject matter of the journal. Only those manuscripts which have not been published elsewhere and have not been submitted by other journals will be considered for publication. Otherwise, the published article will be retracted.

For the article submission, the authors should include the following requirements:

1. Universal Decimal Classification (UDC) – on the top left corner of the page.

2. Title of the article is to briefly reflect the content of the article (no more than 12 words) and be provided in Russian and English.

3. Authors' initials and surnames, scientific degree, academic title, place of employment (full name of organisation, index, country, city, address, e-mail).

4. Abstract (200–250 words) performs the function of an expanded title and informs readers about the article content. It should comprise the following sections:

- Introduction (main research issue, subject and goal of the research).
- Materials and methods.
- Research results.
- Discussion and conclusion (general findings, scope of application).

5. Keywords (5–8 words or short word combinations) are to reflect the main provisions, accomplishments, results, terminology of the scientific research.

6. Acknowledgments. This section is to mention the persons who helped the author to prepare the article; and the organizations that provided financial support. Enclosing gratitude to anonymous reviewers is considered good style.

7. Main text.

8. References (formatted according to GOST P 7.0.5–2008). It is necessary to refer first of all to original sources from scientific journals. It is advisable to use 15–20 Russian and English sources.

9. Information for authors should include:

- full surname, first name, patronymics (in full);
- place of employment: index, city, street, building;
- job title;
- organisation address (index, city, street, building), department (separated by commas);
- e-mail;
- phone number;
- Author ID, ORCID.

10. Contribution of the authors. At the end of the manuscript, authors should include notes that explain the actual contribution of each co-author to the research.

Technical preparation

1) The manuscript should be typed in the Microsoft Word text processing program (.doc, .docx): sheet size – A4; font – Times New Roman; font size – 14; line spacing – 1.5; H-field – 2.0.

2) Formulas are typed by combining the main font and the Symbol font (exception for fractions, sums, square root) in Microsoft Equation 3.0 (Formula Editor in Microsoft Word) or MathType 6. Latin symbols in formulas and notation (both in the text and in the figures) should be typed in italics. All formulas should be numbered in parentheses.

3) Figures should either be presented in vector or raster format (at least 300 dpi resolution). Graphs, diagrams and charts are presented in Microsoft Excel.

4) Tables are included in the text of the article. Each table should be entitled.

The reviewing is an important step in selecting articles. The journal adopts double-blind peer review (the authors' and reviewers' identities are concealed from each other). The reviewer analyses an article and decides whether it should be published (with or without corrections) or rejected. If there is a conflict of interest, the author's reasoned statement is discussed by the Editorial Board.

The editorial policy is based on the Code of Ethics of Scientific Publications issued by the Committee on Publications Ethics (COPE) and considers editors and publishers work ethics standards. Articles are published free of charge.

The Russian Railway Science Journal provides **open access** to its content and adheres to the principle that free open access to research findings increases global knowledge sharing. The open access policy adheres to the definition given by the Budapest Open Access Initiative (BOAI).



Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта»
(ВНИИЖТ)

А. Б. Косарев, С. А. Виноградов, Ю. Н. Король, И. А. Косарев

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ТРАНСПОРТА

МОНОГРАФИЯ



Электробезопасность электроустановок транспорта : монография / А. Б. Косарев, С. А. Виноградов, Ю. Н. Король, И. А. Косарев. — Москва : РАС, 2022. — 448 с. ISBN 978-5-6047616-1-8

Рассмотрены системы электроснабжения железнодорожного транспорта с точки зрения требований электробезопасности, условий работы используемого оборудования и специфики эксплуатационного обслуживания.

Приведена и доказана авторская концепция многофакторного анализа условий электробезопасности электроустановок железнодорожного транспорта. Для этого использован метод неполноблочных планов, экспертного оценивания факторов, а также ряд методик, в том числе методика расчета вероятности безопасной работы электроустановок транспорта, методика аттестации и отбора персонала, занимающегося вопросами обеспечения условий электробезопасности. Представлены технические решения по обеспечению безопасности работ в зонах электромагнитного влияния.

Эффективность предлагаемых средств повышения электрической и электромагнитной безопасности систем железнодорожного электроснабжения оценивается путем сравнения вероятности превышения реальными параметрами электромагнитных полей допустимых значений при отсутствии и наличии предлагаемых технических решений и организационных мероприятий.

Рассмотрены методы расчета различных режимов работы систем тягового электроснабжения с использованием методов линейной алгебры и теории многополюсников.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, ученых и аспирантов, занимающихся вопросами электрифицированного железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru



ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОВ

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
Л. А. Мугинштейн, Л. Н. Понарин, О. В. Ляшко,
С. В. Лобанов, В. Ю. Кирякин, А. Ю. Анфиногенов

Программный комплекс предназначен для моделирования микроуровня, позволяет создавать цифровые двойники железнодорожных направлений для решения задач определения основных факторов, влияющих на стабильный пропуск грузовых поездопотоков на протяженных железнодорожных линиях, и выработки мер по снижению отрицательно влияющих на перевозочный процесс факторов. Имитационное моделирование микроуровня железно-

рожного участка включает объектные модели имитируемых виртуальных объектов железной дороги (перегоны, блок-участки, станции, поезда, локомотивы и т. д.) в объеме, необходимом для проектирования цифровых двойников при решении прикладных задач, в том числе моделировании диспетчерского управления при оперативном перестроении графика движения поездов.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ
№ 2022617512 от 21.04.2022. Заявка № 2022616306 от
08.04.2022. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48492409>

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

ВСТРЕЧА РУКОВОДСТВА НОК

24 июня 2022 года на площадке Корпоративного акселератора РЖД состоялась встреча институтов научно-отраслевого комплекса (НОК) ОАО «РЖД», в которой приняли участие представители Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава (АО «ВНИКИ»), Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»).

По итогам встречи участники определили ряд направлений, которые войдут в программу развития железнодорожной науки в соответствии с указами президента РФ. Это и развитие беспилотных технологий, и инфраструктурные проекты, в том числе на БАМе и Транссибе, создание и обновление систем безопасности и диагностики подвижного состава, создание новых



конструкций пути для тяжеловесного и для выделенного пассажирского движения, экологическая безопасность, испытательная деятельность. По каждому из проектов уже имеются практические наработки.

На встрече обсуждалось создание площадки для реализации совместных проектов институтов. 24 июня принято решение учредить Координационный совет институтов научно-отраслевого комплекса, куда войдут руководители каждого из институтов. В советах будет создан ряд экспертных групп по направлениям совместной деятельности.

Взаимодействие планируется выстраивать в реальном и виртуальном формате. Возможно, у совета появится и свой корпоративный портал. Руководство Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта запланировало ещё ряд встреч в ближайшее время, так как на данном этапе важно составить детальную «инструкцию» по развитию науки на 10 лет. Проект программы будет рассмотрен с техническим блоком компании АО «ВНИИЖТ» на площадке Департамента технической политики.





9 772223 973003