



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: 10.21780/2223-9731-2022-81-2

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 81, № 2. 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:

- 2.5.3. 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)
- 05.02.02. Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
- 05.22.01. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)

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



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:

- 2.5.3. 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)
- 05.02.02. Machine science, drive systems and machine components (technical sciences)
- 05.22.01. Transport and transport technological systems of the country, its regions and cities, organisation of the transport production (technical sciences)

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



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, **Кенжалинова Наталья Валерьевна**, выпускающий редактор, e-mail: kenzhalinova.n@vniizht.ru, **Сиротенко Игорь Васильевич**, научный редактор, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru, **Сергеева Олеся Александровна**, руководитель группы дизайна, e-mail: sergeeva.oe@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 21.06.2022. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 14,25. Тираж 300 экз. Заказ 259. 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, **Natalia V. Kenzhalinova**, Executive Editor, e-mail: kenzhalinova.n@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 21.06.2022. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 14.25 printed sheets. 300 copies. Order No. 259. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

Обращение главного редактора	98–99
------------------------------------	-------

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Предложения по разработке референтной методики измерения боковых сил А. М. Бржезовский	101–113
Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Д. Н. Шевченко, Д. Ю. Расин	114–124
Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электровоза М. Ю. Пустоветов	125–133
Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рессорном подвешивании локомотивов А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская, П. Ю. Иванов	134–147
Поосное перераспределение силы тяги для электровозов с асинхронными тяговыми двигателями Н. Д. Шилин, С. Н. Прокофьев	148–156

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева, А. Ю. Соколов, С. Ю. Кириллова, Е. О. Дмитриев, А. А. Кравченко	158–169
Комплексный анализ эффективности использования современного подвижного состава при перевозках массовых грузов С. П. Вакуленко, М. В. Роменская, К. А. Калинин, К. И. Шведин	170–178
Концептуальная модель организации продвижения вагонопотоков на основе сквозного контроля сроков доставки грузов О. В. Москвичев, Е. А. Мищенко, С. Н. Титаренко	179–187

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Журналу ВНИИЖТ — 80 лет! Часть II. Победа, послевоенное восстановление и современное развитие А. Б. Косарев, О. Н. Римская, И. В. Анохов, И. В. Сиротенко	189–202
---	---------

CONTENTS

Editor-in-Chief address	98–99
-------------------------------	-------

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Proposals for development of a reference method for measuring lateral forces Alexander M. Brzhezovskiy	101–113
Two-layer spherical rubber-metal joints and problems of their calculation features Andrey S. Kosmodamianskiy, Vladimir I. Vorob'ev, Oleg V. Izmerov, Dmitriy N. Shevchenko, Dmitriy Yu. Rasin	114–124
Simulation of a double-circuit subordinated coordinate regulation system of the active power factor corrector for the electric locomotive auxiliary electric drive Mikhail Yu. Pustovetov	125–133
Application of elastically protected hydraulic vibration damper in spring suspension of locomotives Anatoliy N. Savos'kin, Nataliya S. Lavlinskaya, Pavel Yu. Ivanov	134–147
Redistribution of tractive force per axle for electric locomotives with asynchronous traction motors Nikita D. Shilin, Sergey N. Prokof'ev	148–156

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons Andrey F. Borodin, Vitaliy V. Panin, Marina A. Ageeva, Andrey Yu. Sokolov, Svetlana Yu. Kirillova, Egor O. Dmitriev, Artem A. Kravchenko	158–169
Comprehensive analysis of the modern rolling stock efficiency in bulk cargo transportation Sergey P. Vakulenko, Mariya V. Romenskaya, Kirill A. Kalinin, Konstantin I. Shvedin	170–178
Conceptual model of railway car traffic organisation based on the end-to-end control of freight delivery times Oleg V. Moskvichev, Ekaterina A. Mishchenko, Sergey N. Titarenko	179–187

VNIIZHT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

VNIIZhT Scientific Journal celebrates 80th Anniversary! Part II. Victory, post-war recovery and modern development Alexander B. Kosarev, Ol'ga N. Rimskaya, Igor' V. Anokhov, Igor' V. Sirotenko	189–202
--	---------

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА EDITOR-IN-CHIEF ADDRESS



Дорогие авторы и читатели!

Научный журнал ВНИИЖТ был создан ровно 80 лет назад: 1 июня 1942 г. приказом директора Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта НКПС СССР № 163 был учрежден журнал «Техника железных дорог». В трудные для страны годы была остро осознана потребность в своевременном информировании всех работников железнодорожного транспорта о передовых технологиях и методиках восстановления путей сообщения. Выполняя эту задачу, редакция журнала прилагала все силы по оказанию предельно практической, методико-консультативной и научной поддержки по всем вопросам дорожного хозяйства. На наш взгляд, в тех трудных условиях эту задачу редакция выполнила блестяще.

Победа в Великой Отечественной войне поставила не менее важные задачи перед транспортной отраслью и научными институтами — восстановление и масштабное развитие путей сообщения на самой современной научной основе. Железнодорожный транспорт должен был в прямом и переносном смысле стать локомотивом стремительного народно-хозяйственного развития страны.

Соответствующим образом перестраивалась и работа отраслевых научных журналов. Направленность журнала «Техника железных дорог» теперь должна была трансформироваться из прикладной в научно-техническую. Журналу следовало ориентироваться на максимально широкий круг читателей: научных работников железнодорожного транспорта, профессорско-преподавательский состав вузов и техникумов, инженерно-технических работников управлений, линий, лабораторий и др. В результате этих процессов журнал поменял не только содержание, но и название: с 1956 г. он стал называться «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта». Читатели могут проследить историю становления и развития журнала в серии статей «Журналу ВНИИЖТ — 80 лет!» в № 6, 2021 г. и настоящем выпуске.

Dear authors and readers!

The scientific Russian Railway Journal was created exactly 80 years ago: the Technology of Railways journal was established on June 1, 1942 by the order No. 163 of the Director of the All-Union Railway Research Institute of the People's Commissariat of Communication Routes of the Soviet Union. During these years, that were difficult for the country, the need for timely informing all railway workers about the most advanced technologies and methods for restoring the communications was acutely perceived. Fulfilling this task, the editors of the journal made every effort to provide extremely practical, methodological, advisory and scientific support on all issues of the railroad industry. In our opinion, in those difficult conditions, the editorial staff performed this task brilliantly.

The victory in the Great Patriotic War set no less important tasks for the transport industry and scientific institutions: the restoration and large-scale development of communications using the most modern scientific basis. Railway transport was to become, literally and figuratively, the locomotive of the country's rapid economic development.

The work of industry-specific scientific journals was reorganized accordingly. The Technology of Railways journal now had to be transformed from being application-oriented to being more scientific and technical. The journal had to be reoriented towards the widest possible range of readers: railway transport scientists, professorial staff and faculty of technical universities and technical schools, engineering and technical workers of departments, lines, laboratories, etc. As a result of these processes, the journal changed not only its content, but also its name: since 1956, it became known as the Bulletin of the All-Union Railway Research Institute. Readers can trace the history of the establishment and development of the journal in a series of articles VNIIZHT Scientific Journal celebrates 80th Anniversary! in No. 6, 2021 and No. 2, 2022.

В последующие десятилетия журнал чутко реагировал на потребности страны в общедоступных научных знаниях. Менялось содержание, оформление, обложка, уточнялось название. Неизменным оставалось лишь одно: журнал всегда был ведущим железнодорожным научно-техническим изданием страны. Сегодня журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» популяризирует российскую железнодорожную науку и работает на ее лидерство в глобальном научном сообществе, опираясь на богатое историческое наследие.

В день юбилея журнала я хочу поблагодарить весь коллектив редакции журнала, рецензентов, авторов и читателей за воодушевление, энергию и стремление к общим целям.

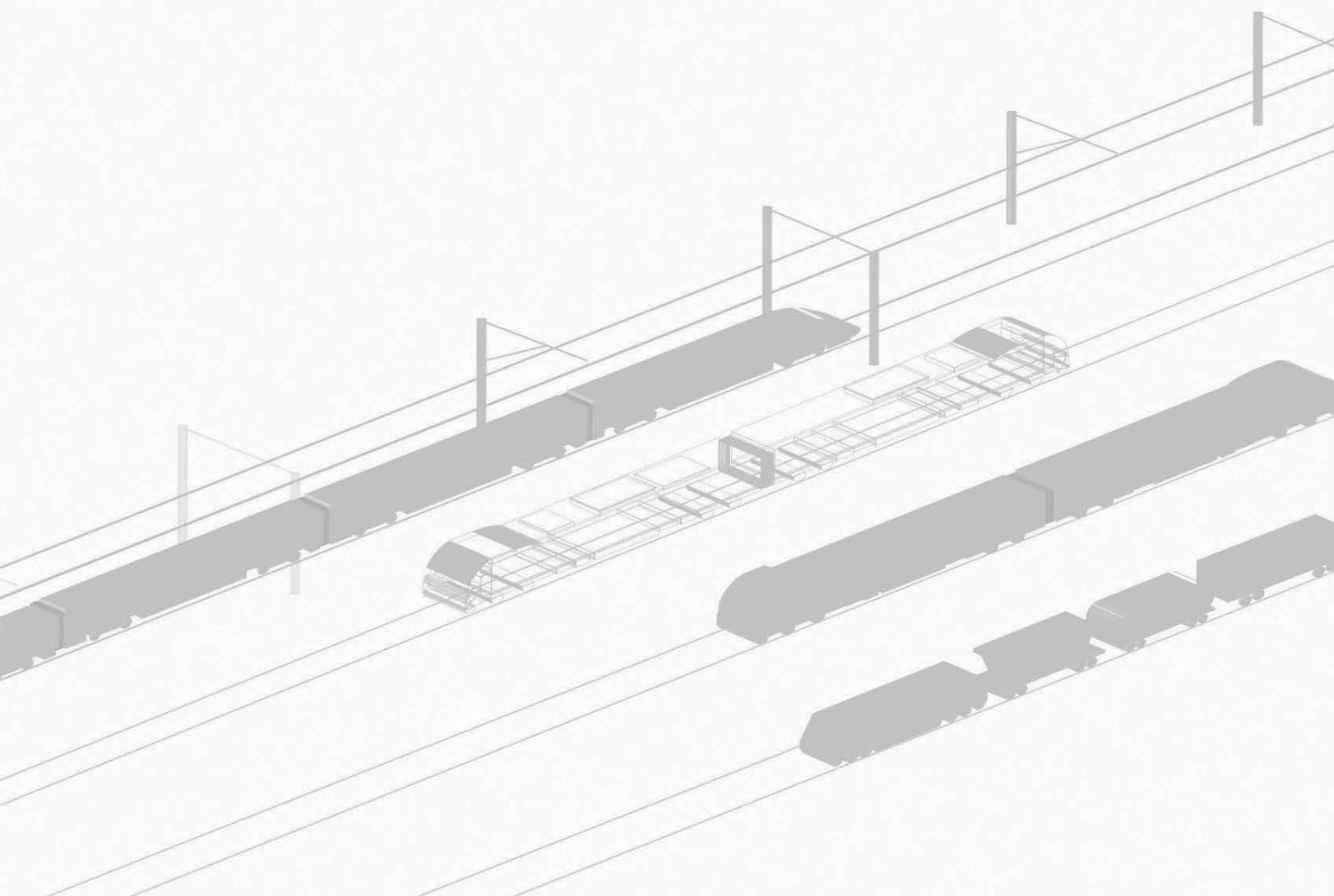
С уважением,
главный редактор журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», первый заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»,
доктор технических наук, профессор
Александр Борисович Косарев

In subsequent decades, the journal was ever responding to the demands of the time and the country's needs for publicly available scientific knowledge. The content, design, cover changed, its name was modified. Only one thing remained unchanged: the journal had always been the country's leading railway scientific and technical title. Today the Russian Railway Science Journal popularizes Russian railway science and strives to uphold its leadership in the global scientific community relying on its rich historical heritage.

On the day of the journal's Anniversary, I want to thank the editorial staff of the journal, reviewers, authors and readers for their inspiration, energy and striving for common goals.

Sincerely,
Editor-in-Chief of the Russian Railway Science Journal,
First Deputy General Director of the Railway Research Institute, Dr. of Sci. (Engineering), Professor
Alexander B. Kosarev

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 625.1.032

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113

EDN: <https://elibrary.ru/afeius>**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ РЕФЕРЕНТНОЙ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ БОКОВЫХ СИЛ****А. М. Бржезовский**Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Рассмотрены предпосылки для выбора наиболее целесообразной применительно к процедуре установления условий обращения подвижного состава на сети железных дорог референтной методики экспериментального определения (измерения) боковой (горизонтальной поперечной) силы, действующей в зоне контакта колеса и головки рельса, — одного из важных силовых факторов взаимодействия подвижного состава и элементов верхнего строения железнодорожного пути. Представлена в обобщенном виде совокупность способов экспериментальной оценки боковых сил на основе измерения деформаций рельсов, нашедших применение в работах аттестованных испытательных центров железнодорожной техники России и государств Содружества.

Материалы и методы. В качестве критериев обоснованности выбора референтной методики измерений по совокупности известных экспериментальных методик предлагается принимать статистические оценки погрешности измерений, установленные действующими межгосударственными нормативными актами.

Определение референтной методики измерений предполагает проведение целенаправленных экспериментов с аналогичными условиями, в том числе по типам испытуемого подвижного состава, параметрам устройства и конструкции верхнего строения пути измерительного участка, метеорологическим параметрам и др. В соответствии с требованиями нормативных документов Росстандарта применяются процедуры, которые наряду с требованиями, предъявляемыми к условиям проведения экспериментов, включают в себя также выбор и обоснование опорного значения измеряемого показателя, сравнения статистических оценок погрешности измерения боковых сил.

Результаты. Представлены условия проведения калибровочных экспериментов. Описаны способы статистической обработки экспериментальной информации различных рассмотренных методик измерения боковых сил, позволяющих обосновать выбор референтной методики измерений.

Обсуждение и заключение. Представленный способ определения референтной методики измерения боковых сил воздействия колеса на головку рельса по деформациям рельса учитывает требования нормативных документов Росстандарта и может найти применение при экспериментальном оценивании показателей взаимодействия в механической системе «колесо — рельс».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подвижной состав, условия обращения подвижного состава, измерительные участки пути, референтная методика измерений, боковые силы, погрешность измерений

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Бржезовский А. М. Предложения по разработке референтной методики измерения боковых сил // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 101–113. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.1.032

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113

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



PROPOSALS FOR DEVELOPMENT OF A REFERENCE METHOD FOR MEASURING LATERAL FORCES

Alexander M. Brzhezovskiy

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers the prerequisites for choosing the most expedient reference method of experimental determination (measurement) of the lateral (horizontal transverse) force acting in the contact zone of the wheel and the rail head in relation to the procedure for establishing the conditions for the circulation of rolling stock on the railway network. This is one of the important force factors of the interaction of the rolling stock with the elements of the permanent way of the railway track. The author presents a set of methods for experimental evaluation of lateral forces based on the measurement of rail deformations, which were applied in the works of certified testing centres for railway equipment in Russia and the Commonwealth states.

Materials and methods. Based on a set of known experimental techniques, the author proposed to take statistical estimates of the measurement error established by the current interstate regulations as criteria for the validity of the choice of a reference measurement technique. Determination of the reference measurement technique involves conducting purposeful experiments with similar conditions, including the types of rolling stock under test, the parameters of the device and structure of the permanent way of the measured section, meteorological parameters, etc. The author has applied the procedures that include the choice and justification of the reference value of the measured indicator, comparison of statistical estimates of the measurement error of lateral forces along with the requirements imposed on the conditions for conducting experiments in accordance with the requirements of regulatory documents of Rosstandart.

Results. As a result, the author described the methods for statistical processing of experimental information of various considered techniques for measuring lateral forces, which enabled to justify the choice of the reference measurement technique.

Discussion and conclusion. The presented method for determining the reference method for measuring the lateral forces of the impact of the wheel on the rail head according to the deformations of the rail considers the requirements of the regulatory documents of Rosstandart and can be used in the experimental evaluation of interaction indicators in the mechanical wheel – rail system.

KEYWORDS: rolling stock, rolling stock circulation conditions, measuring track sections, reference measurement technique, lateral forces, measurement error

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Brzhezovskiy A. M. Proposals for development of a reference method for measuring lateral forces. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):101-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-101-113>.

Введение. Концепция проведения комплексных исследований процессов взаимодействия в системе «колесо — рельс», проводимых как с целью установления безопасных условий движения подвижного состава на железнодорожном пути в рамках приемочных испытаний, так и с целью подтверждения соответствия объектов железнодорожного транспорта требованиям технических регламентов ТР ТС 001/2011 [1] и ТР ТС 002/2011 [2], в существенной части основана на оценке боковых сил. Боковая сила представляет собой проекцию пространственной силы, действующей в зоне контакта колеса и головки рельса в горизонтальной поперечной плоскости. Исходя из определения термина «боковая сила» по ГОСТ Р 55050–2012 [3], экспериментальному исследованию подлежит условный силовой фактор, воздействие которого на железнодорожный путь приводит к реальным негативным последствиям — деформациям элементов верхнего строения пути, интенсивному накоплению этих деформаций, потере поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и др. Первые попытки нормирования боковых сил на отечественных железных дорогах, вероятно, относятся к концу 50-х — началу 60-х гг. прошлого века [4, 5], но актуальность этих нормативов подтверждается и современными требованиями эксплуатации путевой инфраструктуры.

Прямое измерение боковых сил техническими средствами, смонтированными на подвижном составе (например, тензометрические колесные пары или колесные блоки), сопряжено с высокой технической сложностью, что затрудняет практическое применение для оперативного осуществления указанных выше целей. Установлено, что наиболее целесообразным является косвенная оценка боковых сил по деформациям рельса: поперечного или продольного изгиба шейки рельса, а также растяжения-сжатия головки и кромок подошвы рельса. В связи с многообразием методик косвенной оценки боковых сил по экспериментально измеренным деформациям рельса актуальным является выбор таких методик, которые дают наилучшие приближения к фактически действующим силовым факторам и имеют минимально возможные погрешности измерений. Настоящее исследование проведено с целью формирования предложений к разработке референтной методики измерений (РМИ) на основе обобщения широко применяемых и перспективных методик измерения боковых сил.

Материалы и методы. Согласно положениям Федерального закона от 21.07.2014 г. № 254 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» [6] «РМИ — аттестованная методика (метод) измерений, используемая для оценки правильности результатов измерений, полученных

с использованием других методик (методов) измерений одних и тех же величин». РМИ должны соответствовать действующим нормативным документам государственной системы обеспечения единства измерений, объекту измерений с целью его надлежащей идентификации, измеряемым величинам (показателям), единице измерения и диапазону измерения, точности измерений.

Для описания точности метода измерений используется термин «правильность». Правильность характеризует степень близости среднего арифметического значения измеряемого показателя по большому числу результатов измерений к истинному или принятому опорному значению показателя и выражается в терминах систематической погрешности (смещения). Метрологические характеристики «точность» и «правильность» РМИ принимаются согласно определениям, введенным семейством стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 [7]. РМИ — это «тщательно изученная методика выполнения измерений, позволяющая получить значения, имеющие неопределенность измерения (u_a), соразмерную с предполагаемым их использованием, особенно при оценке других процедур измерения той же величины...» [8]. Рассмотрим возможные направления выбора РМИ с оценкой неопределенности измерения u_a применительно к задаче экспериментального определения боковых сил по деформациям рельса.

На начальном этапе выбора РМИ решается задача обоснования величин истинного значения показателя — боковой силы. Однако истинное значение боковой силы является неопределенным из-за условного характера и отсутствия физического эталона этого показателя. В связи с этим в соответствии с рекомендацией ГОСТ Р ИСО 5725-6–2002 допускается использовать вместо истинного значения измеряемой величины его опорное значение, т. е. такое значение, которое может быть использовано как количественный эталон для сопоставления со значениями величин того же рода [7]. Следовательно, для разработки РМИ требуется для каждого конкретного условия проведения измерений боковой силы F_y (тип подвижного состава, порядковый номер следования колесной пары в экипаже, план линии, скорость и направление движения и т. д.) принимать соответствующее этому конкретному условию опорное значение $<F_y>$.

Величину $<F_y>$ целесообразно принимать либо по результатам моделирования, либо на основе экспериментальной косвенной оценки боковой силы. В последнем случае целесообразно использовать надежные экспериментальные данные, например получаемые путем суммирования рамной силы Y_p и силы трения [4]:

$$\langle F_y \rangle \approx Y_p + \mu P, \quad (1)$$

где μ — коэффициент трения (для экспериментальной оценки боковых сил принимается равным 0,2); P — статическая нагрузка колеса подвижного состава на рельс, кН, определяемая с учетом требований ГОСТ 33760–2016 [9].

Существенным является то, что измерение рамных сил на подвижном составе вполне надежно в связи с наличием реального эквивалента силы, подтвержденного путем физической калибровки тензометрической схемы или датчика рамной силы. Применение экспериментальной оценки рамной силы в качестве исходного достоверного показателя для определения $\langle F_y \rangle$ является вполне оправданным. Проведенными исследованиями установлена тесная корреляционная связь экспериментальных значений боковых и рамных сил. Так, коэффициенты корреляции для локомотивов различных типов составляют от 0,56 до 0,90 [10], для груженых грузовых вагонов на тележках модели 18-100 от 0,70 до 0,90 [11]. Кроме того, регламентированные стандартами [12, 13] погрешности существующих методов регистрации рамных сил на основе измерения деформаций рам тележек или относительных горизонтальных поперечных перемещений упругих элементов рессорного подвешивания составляют $\pm 1...5\%$ по грузовым и пассажирским вагонам и не более $\pm 10\%$ для моторвагонного подвижного состава и локомотивов.

Стоит отметить, что произведение μP в связи со случайным характером коэффициента трения обладает существенной неопределенностью. Пределы изменения μ по различным источникам могут составлять от 0 до 50 % относительно некоторого наперед заданного расчетного значения. В связи с этим при разработке РМИ следует учитывать необходимость адекватной оценки μ в соответствии с конкретными условиями измерения боковых сил.

По результатам обобщения и ранжирования совокупности факторов, влияющих на количественную оценку μ , проведенных проф. Ю. М. Лужновым [14], установлено, что наиболее значимыми факторами являются давление в контакте колеса и рельса, скорость движения и фактическая площадь контакта. При этом для железнодорожного экипажа с нагрузкой на ось 23 тс существует количественная оценка $\mu_p \approx 0,28$, подтвержденная экспериментально с применением трибометра на рельсах при неизменных внешних условиях. Поэтому при проведении сравнительных экспериментов представляется целесообразным использовать железнодорожный экипаж со статической нагрузкой на ось 23 тс, при движении которого по измерительному участку пути одновременно регистрировать угол набегания колеса на рельс α

с использованием функциональной зависимости коэффициента трения $\mu_\alpha(\alpha)$ [15].

Для определения $\langle F_y \rangle$ рекомендуется

$$\mu = 0,5(\mu_p + \mu_\alpha). \quad (2)$$

Определение α проводится, например, с применением экспериментальной методики, апробированной канд. техн. наук А. В. Завертальюком для исследований параметров трения в скользких трехэлементных тележках модели 18-100 [16]. Методика основана на определении суммы углов поворота тележки относительно кузова и колесной пары относительно рамы тележки с учетом «забега» боковых рам тележки, т. е. учитывается фактическое состояние тележек вагона.

Установление опорного значения боковой силы способом (1) реализуется с применением принципа комплексности измерения показателей динамических качеств подвижного состава и его воздействия на путь. Методика комплексных испытаний (измерений) предполагает определение совокупности опорных значений боковых сил $\langle F_y \rangle_{ij}$, соответствующих установленным программой испытаний факторам, например количеству измерительных участков пути i и диапазону скоростей движения j . Предварительно выбираются такие измерительные сечения на пути, при проследовании которых испытуемым подвижным составом регистрируются наибольшие (по модулю) амплитуды рамных сил [17]. Количество таких сечений на протяжении одного измерительного участка пути длиной 25 м должно быть не менее четырех.

Все известные к настоящему времени методы экспериментальной оценки боковых сил на основе регистрации деформаций рельса содержат систематическую погрешность, обусловленную объективной реальностью — наличием функциональной связи боковых и вертикальных сил в контакте колеса и рельса в каждый момент времени. В связи с этим возможность применения любого метода экспериментальной оценки боковых сил по деформациям рельса обусловлена практически реализуемым способом компенсации влияния вертикальной силы F_z и эксцентриситета ее точки приложения к головке рельса e на результат измерения боковой силы. Решение о выборе РМИ может быть принято на основе сравнения статистических оценок погрешности измерения с принятыми для исследования соответствующими оценками опорных значений боковых сил.

Предлагаются следующие этапы разработки РМИ:

- 1) выбор измерительных участков пути и оборудование их тензометрическими схемами, соответствующими альтернативным методикам экспериментальной оценки боковых сил;
- 2) калибровка тензометрических схем;

3) отбор и оборудование железнодорожного подвижного состава; условия проведения эксперимента;

4) обработка динамических процессов с определением F_{yij} , μ_{ij} и $\langle F_y \rangle_{ij}$; обоснование выбора РМИ.

Рассмотрим содержание работ по реализации перечисленных этапов.

Выбор измерительных участков пути и оборудование их тензометрическими схемами, соответствующими альтернативным методикам экспериментальной оценки боковых сил. Сравнительные эксперименты могут быть проведены на двух-трех смежных рельсовых звеньях длиной 25 м с рельсами типа Р65, имеющих фактический эксплуатационный износ головки и расположенных, например, в пределах круговой кривой радиусом 650 м на 16/17 км перегона Ханская — Майкоп Скоростного испытательного полигона АО «ВНИИЖТ». На шейке, кромках подошвы и головке рельса в шести расположенных

последовательно шпальных ящиках наружной рельсовой нити круговой кривой монтируются схемы тензорезисторов (измерительные сечения), реализующие альтернативные методы измерения боковых сил в соответствии с табл. 1. В перечень не включена методика кусочно-непрерывной регистрации боковых сил [18], что обусловлено невозможностью однозначного определения $\langle F_y \rangle$ по длине участка регистрации. Из табл. 1 видно, что некоторые методы (методики) измерения боковых сил имеют официальное утверждение органами метрологии Российской Федерации — № 1 и 6. Еще один метод (№ 3) запатентован. Монтаж тензометрических схем на рельсах измерительных сечений иллюстрируется рис. 1–7.

Суть метода № 1 (рис. 1 [19]) заключается в использовании имеющейся прямой пропорциональной зависимости боковых сил от разности изгибающих моментов, действующих на взаимно симметричные

Таблица 1

Альтернативные методики измерения боковых сил с использованием тензодатчиков, смонтированных на рельсе

Table 1

Alternative methods for measuring lateral forces using rail mounted strain gauges

№ метода	Метод измерения	Количество тензодатчиков в одной тензометрической схеме	Количество каналов измерения боковой силы	Источники информации	Примечания
1	Метод измерения напряжений поперечного изгиба в шейке рельса по разности изгибающих моментов (метод Шлупфа)	4	1, полный мост Уитстона	[4, 20]	Метод регламентирован ГОСТ Р 55050–2012
2	То же с применением шунтирующих резисторов	6	То же	[19]	
3	То же с применением метода двойного моста	8	То же	[21]	Патент «Устройство для определения давления колеса на рельс» — А.с. SU 1794740, Бюл. № 6, 15.02.1993
4	Метод измерения напряжений в кромках подошвы рельса и в наружной части головки рельса («трехточечный» метод О. П. Ершкова)	2	3, ½ моста с температурной компенсацией	[22]	
5	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса датчиками, расположенными вдоль оси кручения рельса	2	1, ½ моста с температурной компенсацией	[23]	
6	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса с последующей обработкой результатов с применением псевдоматриц — метод «РЖД-2016»	2	4	[24]	Методика «РЖД-2016», свидетельство об аттестации от 30.08.2019 № 103-200RA.RU/311787–2016/2019
7	Метод измерения напряжений изгиба в шейке рельса с компенсацией напряжений вертикального изгиба	2	3, ½ моста с температурной компенсацией	[25]	

относительно нейтральной оси шейки рельса точки A и C поперечного сечения рельса. В качестве измерителя используется полный мост Уитстона с температурной самокомпенсацией. Изгибающие моменты относительно точек A и C шейки рельса от действия боковой силы F_y и приложенной к головке рельса в точке с эксцентриситетом e вертикальной силы F_z можно записать в виде

$$M_A = F_y l_1 - F_z e; M_C = F_y l_2 - F_z e, \quad (3)$$

где l_1, l_2 — расстояния от плоскости приложения боковой силы F_y до точек A и C поперечного сечения рельса, м.

Тогда

$$F_y = (M_C - M_A) / (l_2 - l_1). \quad (4)$$

Схема непосредственно определяет боковые силы в местной системе координат рельса и теоретически не может давать существенную ошибку, обусловленную наличием эксцентриситета e .

Методы № 2 и 3 также основаны на применении для измерений боковой силы моста Уитстона (рис. 1). При этом с целью исключения влияния на результаты измерения систематической погрешности, которая может возникнуть в связи с влиянием на результаты измерений эксцентриситета e , предложены варианты модернизации тензометрических схем. Так, в схеме, формируемой по методу № 2, используются шунтиру-

ющие тензорезисторы $R_{ш}$, подключаемые параллельно тензорезисторам 1 и 2 верхнего пояса шейки рельса (рис. 1), равные [19]

$$R_{ш} = R / (k - 1); k = (\xi_{A_i} - \xi_{A_a}) / (\xi_{C_i} - \xi_{C_a}), \quad (5)$$

где $\xi_{A_i}, \xi_{A_a}, \xi_{C_i}, \xi_{C_a}$ — деформации верхнего (сечение A) и нижнего (сечение C) пояса шейки рельса с внутренней i (тензорезисторы 1, 3 и 5) и наружной стороны a (тензорезисторы 2, 4 и 6); k — корректирующий коэффициент.

Суть метода № 3 заключается в реализации различающихся по величине напряжений питания мостов U_{e1} и U_{e2} , при этом $U_{e1} / U_{e2} \approx \xi_1 / \xi_2 \approx m$, где ξ_1 и ξ_2 — деформации в сечениях A и C шейки рельса (рис. 1).

Для реализации этой схемы требуется подключить дополнительный блок питания с плавной регулировкой напряжения к одной из схем, например U_{e2} (рис. 2). Питание первой схемы и снятие полезного сигнала производится с помощью штатного мостового тензометрического кабеля, а регулировка напряжения питания второй схемы должна компенсировать влияние вертикальной силы, приложенной эксцентрично к головке рельса. Соотношение напряжений U_{e1} и U_{e2} определяется в процессе калибровочного эксперимента.

Метод № 4 («трехточечный» метод О. П. Ершкова) основан на измерении деформаций головки и кромок подошвы рельса (рис. 3). Алгебраическая комбинация напряжений, возникающих в этих точках поперечного сечения рельса, пропорциональна боковой силе [22]:

$$F_y = 4W_z K_y (A_1 \sigma_{пнар} + A_2 \sigma_{пвн} + A_3 \sigma_{гнар}), \quad (6)$$

где W_z — горизонтальный момент сопротивления рельса относительно волокон подошвы, см³; K_y — коэффициент относительной горизонтальной жесткости рельса и подрельсового основания с учетом трения в горизонтальной плоскости, 1/см; $\sigma_{пнар}, \sigma_{пвн}, \sigma_{гнар}$ — экспериментальные значения напряжений соответственно в наружной и внутренней кромке подошвы рельса и в наружной грани головки рельса, МПа; A_1, A_2, A_3 — коэффициенты, определяемые геометрическими параметрами поперечного сечения рельса.

Измерения напряжений $\sigma_{пнар}, \sigma_{пвн}, \sigma_{гнар}$ производятся с применением полумостовых и полных мостовых тензометрических схем с температурной компенсацией или без нее, формируемых на наружной и внутренней кромках подошвы рельса в одном его поперечном сечении. Для оценки напряжения в наружной грани головки рельса тензорезистор наклеивают на наружной поверхности головки рельса с расположением центра датчика на уровне 13 мм от верхней поверхности рельса. При использовании температурной компенсации активные тензорезисторы

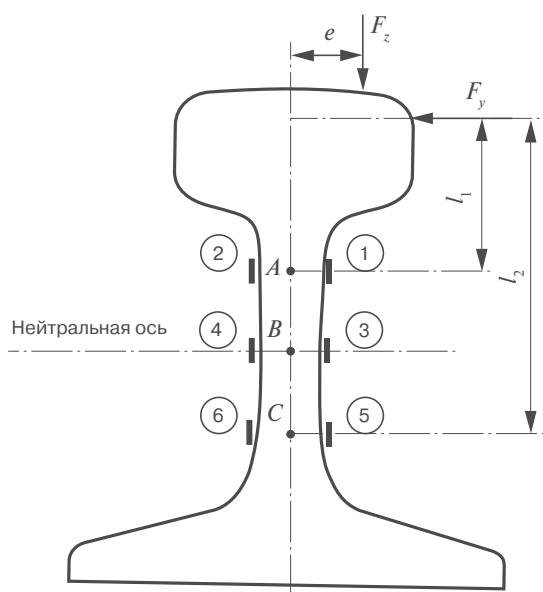


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов на шейке рельса:
1–6 — номера тензорезисторов

Fig. 1. Diagram of locations of strain gauges on the rail web:
1–6 — numbers of strain gauges

ориентируют параллельно продольной оси рельса, а компенсационные могут наклеиваться как на рельс перпендикулярно продольной оси, так и на компенсационную колодку, изготовленную из рельсовой стали. При использовании тензометрических схем без температурной компенсации необходимо применять измерительную аппаратуру, позволяющую перед каждым заездом проводить аппаратную или программную балансировку нуля. Активные тензорезисторы наклеивают таким образом, чтобы рабочая ось датчика располагалась на расстоянии не более 5 мм от наружной и внутренней кромок подошвы рельса.

При оборудовании тензометрической схемы по методу № 5 тензорезисторы монтируются с правой и левой стороны шейки рельса горизонтально вдоль его оси кручения (ось кручения рельса Р65 расположена на расстоянии 39,4 мм от подошвы рельса) в одном его поперечном сечении (рис. 4). Деформации шейки рельса регистрируются с применением полумостовой тензометрической схемы с температурной самокомпенсацией с активными датчиками в плечах моста.

Монтаж тензорезисторов при оборудовании шейки рельса по методу № 6 производится по аналогии с методом № 1 (рис. 1). Измеряются три компонента суммарной нагрузки на рельс, действующей от колеса подвижного состава: вертикальная сила, боковая сила и опрокидывающий момент. Метод основан на том, что тензорезисторы, наклеенные в четырех зонах шейки рельса, соединяют в измерительные мосты. Каждый мост подключают к отдельному измерительному каналу тензометрической аппаратуры, позволяющей регистрировать отклик в измерительных каналах на изменение входных факторов. Монтаж тензорезисторов при оборудовании шейки рельса по методу № 7 производится по схеме, представленной на рис. 5.

В местах, обозначенных цифрами 1, 2 и 3 на рис. 5, наклеиваются по два тензорезистора, ориентированных по горизонтальной и вертикальной осям поперечного сечения рельса. Тензорезисторы попарно объединяются в три полумостовые схемы с температурной компенсацией. Экспериментальная оценка боковых сил вычисляется по результатам обработки откликов тензометрических схем при их калибровке на приложение различных сочетаний вертикальных и горизонтальных нагрузок на головку рельса в оборудованном тензорезисторами сечении рельса.

Калибровка тензометрических схем и применение специальных алгоритмов обработки. Калибровочные эксперименты при измерениях деформаций рельса методами № 1–3 и 5 проводятся посредством нагружения поперечных сечений рельса в местах, оборудованных тензометрическими схемами, одновременно по направлениям двух координат — вертикальному и

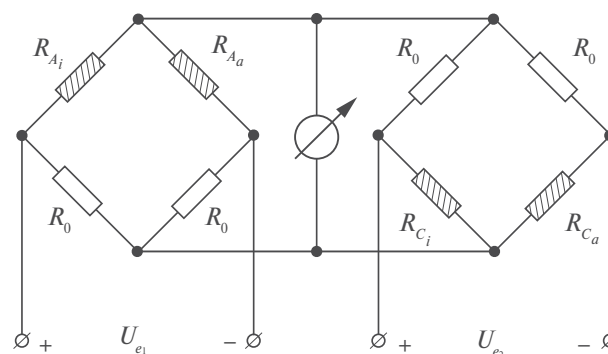


Рис. 2. Тензометрическая схема, реализующая метод № 3

Fig. 2. Strain gauge layout that implements the method No. 3

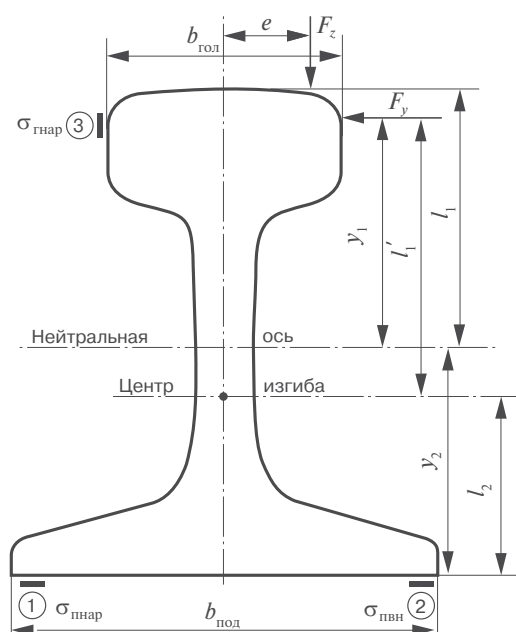


Рис. 3. Монтаж тензорезисторов на рельсе по методу № 4:
1, 2, 3 — номера тензорезисторов

Fig. 3. Installation of strain gauges on the rail according to the method No. 4:
1, 2, 3 — numbers of strain gauges

горизонтальному поперечному. Вертикальная нагрузка величиной до 60–80 кН прикладывается к головке рельса через стальной адаптер, геометрические размеры которого имитируют стадию набегания гребня колеса на головку рельса с полной выборкой зазоров. При этом $e \neq 0$. Горизонтальная нагрузка наибольшей величиной 0–60 кН прикладывается к головке рельса (в средней части на уровне не менее 20 мм от верха головки) после приложения вертикальной нагрузки ступенями по 20 кН. Преимуществом этих методов является возможность непосредственного, без дополнительного пересчета, использования масштабов регистрации боковой силы, определенных по результатам

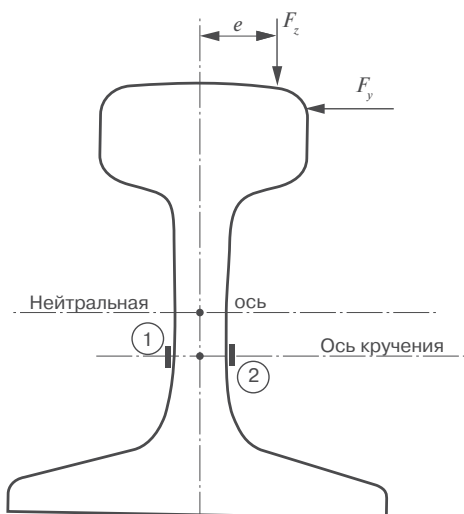


Рис. 4. Монтаж тензорезисторов на рельсе по методу № 5:
1, 2 — номера тензорезисторов

Fig. 4. Installation of strain gauges on the rail according to the method No. 5:
1, 2 — numbers of strain gauges

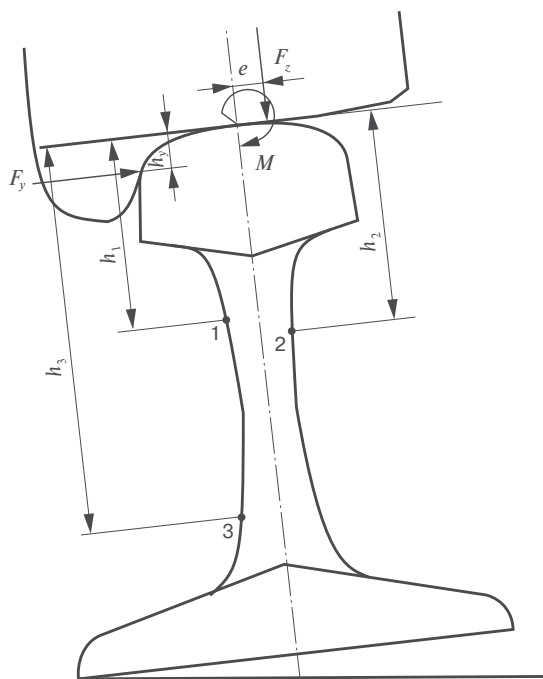


Рис. 5. Монтаж тензорезисторов в сечениях 1, 2 и 3 на шейке рельса
Fig. 5. Installation of strain gauges in 1, 2 and 3 sections on the rail web

калибровочного эксперимента, для оценки амплитуд боковой силы в натурном эксперименте.

Обработка результатов калибровочного эксперимента при реализации методов № 1–3 и 5 происходит следующим образом: в процессе каждого этапа калибровки после приложения полной вертикальной нагрузки к головке рельса непосредственно перед при-

ложением горизонтальной нагрузки производится балансировка канала регистрации боковой силы. Перед проведением балансировки фиксируются отклики канала регистрации боковой силы на воздействие максимальной вертикальной силы на каждом k -м этапе калибровки, исключаемые при балансировке канала регистрации боковой силы p_{qk} .

Масштаб обработки канала регистрации боковой силы $M_{ш}$ вычисляется как среднее арифметическое значение масштабов по k этапам калибровочного эксперимента:

$$M_{ш} = \left(\sum M_{qk} \right) / n_{qk} = \left(\sum (F_{y \max qk} / \delta_{qk}) \right) / n_{qk}, \text{ кН/мВ/В}, \quad (7)$$

где $F_{y \max qk}$ — наибольшая горизонтальная сила при калибровке, кН; δ_{qk} — отклик канала регистрации, соответствующий наибольшей горизонтальной силе по всей совокупности q циклов и k этапов калибровочного эксперимента; n_{qk} — общее количество нагружений по калибровочному эксперименту в целом.

При использовании метода № 3 соотношение напряжений U_{e1} и U_{e2} в процессе калибровочных нагружений определяется для каждого q -го цикла нагружения на каждом k -м этапе калибровки:

$$(U_{e1} / U_{e2})_{qk} = m_{qk}. \quad (8)$$

По результатам калибровочного эксперимента величина m вычисляется как среднее арифметическое значение, устанавливаемое на весь период использования канала регистрации:

$$m = \sum m_{qk} / n_{qk}. \quad (9)$$

Масштаб записи боковой силы по каналу регистрации вычисляется на основании соотношения (7).

При применении метода № 4 электрическая калибровка каналов регистрации напряжений $\sigma_{пнар}$, $\sigma_{пвн}$ и $\sigma_{гнар}$ производится последовательно путем шунтирования каждого канала регистрации активным сопротивлением, эквивалентным величине напряжения, равной $\sigma_k \approx 240$ МПа (для полумостовой схемы с тензорезисторами, имеющими активное сопротивление в плече $R_n \approx 200$ Ом и коэффициент тензочувствительности $K_T \approx 2,2$, активное сопротивление шунта составляет $R_{ш} \approx 1000$ Ом). Масштабы записи напряжений по каждому каналу регистрации при этом составляют

$$M_{ТТ} = \sigma_k / \delta_k, \text{ МПа/мВ/В}, \quad (10)$$

где δ_k — отклик канала регистрации при электрической калибровке.

По аналогии с методом № 1 в процессе каждого этапа калибровочного эксперимента после приложения полной вертикальной нагрузки к головке рельса непосредственно перед приложением горизонтальной нагрузки производится балансировка каналов регистрации напряжений $\sigma_{\text{пнар}}$, $\sigma_{\text{пвн}}$ и $\sigma_{\text{гнар}}$. Перед проведением балансировки фиксируются отклики каналов регистрации напряжений на воздействие максимальной вертикальной силы на каждом k -м этапе калибровки, исключаемые при балансировке канала регистрации боковой силы ρ_{qk} .

Измеренная по результатам калибровочного эксперимента величина боковой силы определяется по выражению (6) с учетом масштабов записи напряжений (10) по каждому каналу регистрации.

Для получения связи между показаниями тензорезисторов и нагрузками при экспериментальной оценке боковых сил по методу № 6 «РЖД-2016» [24] проводятся калибровочные эксперименты, включающие в себя следующие варианты нагружения измерительного сечения рельса:

- 1) вертикальной силой в середине головки рельса F_z^{T1} ;
- 2) одновременно вертикальной силой в середине головки рельса F_z^{T2} и боковой силой F_y^{T2} ;
- 3) вертикальной силой, смещенной на величину e наружу от середины головки рельса F_{zH}^{T3} ;
- 4) вертикальной силой, смещенной на величину e внутрь от середины головки рельса F_{zB}^{T4} .

Результаты показаний тензорезисторов S заносятся в табл. 2. Используя линейную суперпозицию, получаем матрицу $[G]$ для искомых силовых факторов (табл. 3).

В матричном виде можно записать

$$\{S(t)\} = \begin{Bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \\ s_4(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_z(t) \\ F_y(t) \\ M_x(t) \end{Bmatrix} = [G]\{F(t)\}. \quad (11)$$

Таблица 2

Показания тензорезисторов при калибровочных экспериментах

Table 2

Indications of strain gauges during gauging experiments

Номер тензорезистора	$F_z^{T1} = 10 \text{ тс}$	$F_z^{T2} = 10 \text{ тс}$ $F_y^{T2} = 10 \text{ тс}$	$F_{zH}^{T3} = 10 \text{ тс}$	$F_{zB}^{T4} = 10 \text{ тс}$
1	S_1^{T1}	S_1^{T2}	S_1^{T3}	S_1^{T4}
2	S_2^{T1}	S_2^{T2}	S_2^{T3}	S_2^{T4}
3	S_3^{T1}	S_3^{T2}	S_3^{T3}	S_3^{T4}
4	S_4^{T1}	S_4^{T2}	S_4^{T3}	S_4^{T4}

Таблица 3

Коэффициенты матрицы $[G]$ при четырех калибровочных экспериментах

Table 3

Matrix coefficients $[G]$ for four calibration experiments

Номер эксперимента	$F_z = 1 \text{ тс}$	$F_y = 1 \text{ тс}$	$M = 1 \text{ тс} \cdot \text{мм}$
1	$g_{11} = s_1^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{21} = (s_1^{T2} - g_{11} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{31} = (s_1^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_1^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
2	$g_{12} = s_2^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{22} = (s_2^{T2} - g_{12} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{32} = (s_2^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_2^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
3	$g_{13} = s_3^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{23} = (s_3^{T2} - g_{13} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{33} = (s_3^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_3^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$
4	$g_{14} = s_4^{T1} / F_z^{T1}$	$g_{24} = (s_4^{T2} - g_{14} F_z^{T2}) / F_y^{T2}$	$g_{34} = (s_4^{T3} / F_{zH}^{T3} - s_4^{T4} / F_{zB}^{T4}) / d/2$

Вычислив псевдообратную матрицу $[G]$, матрицу $[G]^+ = ([G]^T [G])^{-1} [G]^T$, получим возможность определения (восстановления) силовых факторов по показаниям тензодатчиков:

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_z(t) \\ F_y(t) \\ M_x(t) \end{Bmatrix} = [G]^+ \{S(t)\}. \quad (12)$$

При проведении калибровочных экспериментов целесообразно использовать приспособление (стенд), разработанное АО «ВНИКТИ» [24].

Метод № 7 предполагает проведение следующей процедуры калибровочного эксперимента [25]. При расположении тензометрических схем № 1 и 3 с внутренней стороны рельса, а № 2 — с наружной (рис. 5) выражения для определения напряжений σ_i в i -х ($i = 1, 2, 3$) сечениях шейки рельса имеют вид

$$\sigma_i = a_i F_z + (-1)^i b_i F_y + (-1)^i c_i M, \quad (13)$$

где коэффициенты влияния равны $a_i = K_{F_{zi}} / \varphi_i$, $b_i = K_{F_{yi}} (h_i - h_y) / W_i$, $c_i = K_{M_i} / W_i$; $K_{F_{zi}}$, $K_{F_{yi}}$, K_{M_i} — коэффициенты передачи; φ_i — площадь соответствующего сечения шейки рельса; W_i — момент сопротивления в данном сечении; h_i — расстояние от поверхности катания на головке рельса до центра измерительного тензорезистора в i -м сечении шейки рельса; h_y — расстояние от поверхности катания рельса до точки приложения боковой силы.

В процессе калибровки производятся нагружения головки рельса:

- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 0$ и $e = 0$; в этом случае $a_i = \sigma_i / F_z$;
- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 0$ и $e \neq 0$; в этом случае $c_i = (\sigma_i - a_i F_z) / (-1)^i M$;
- вертикальной силой $F_z = 100 - 120$ кН при $F_y = 50 - 60$ кН и $e \neq 0$; в этом случае $b_i = (\sigma_i - a_i F_z) / (-1)^i F_y$.

По результатам калибровки формируется система трех уравнений с тремя неизвестными силовыми параметрами (13). Поскольку определение боковой силы производится в результате решения системы уравнений, результаты замеров не зависят от мест наклейки и коэффициентов передачи тензорезисторов.

Решение системы трех линейных уравнений для определения величины сил взаимодействия в зависимости от напряженного состояния рельса в рассматриваемом его сечении имеет вид

$$\begin{aligned} F_z &= A_{F_{z1}} S_1 + B_{F_{z2}} S_2 + C_{F_{z3}} S_3; \\ F_y &= A_{F_{y1}} S_1 + B_{F_{y2}} S_2 + C_{F_{y3}} S_3; \\ M &= A_{M1} S_1 + B_{M2} S_2 + C_{M3} S_3, \end{aligned} \quad (14)$$

где S_i — показания i -го датчика под действующей в рассматриваемом сечении рельса системой нагрузок.

Коэффициенты матрицы (14) определяются решением уравнений (13) либо по формулам Крамера, либо как элементы псевдообратной матрицы.

Систематическая погрешность измерения боковой силы, обусловленная влиянием эксцентриситета точки приложения вертикальной силы, исходя из того, что совокупные технологические случайные погрешности измерений идентичны для всех рассматриваемых методов экспериментального определения боковых сил, определяется выражением

$$\gamma = \left(\sum (p_{qk} / \delta_{qk}) / n_{qk} \right) \cdot 100 \%. \quad (15)$$

Отклики p_{qk} и δ_{qk} при проведении калибровочного эксперимента по методам № 1–3 и 5 вычисляются либо в размерности канала регистрации (мВ/В), либо в натуральной размерности (кН) с использованием соответствующих масштабных коэффициентов $M_{ш}$ (7).

По результатам калибровочного эксперимента по методу № 4 отклики p_{qk} и δ_{qk} вычисляются в натуральной размерности (кН) с использованием выражения (6) и масштабного коэффициента $M_{ТТ}$ (10). Предварительное определение систематической погрешности измерений боковых сил, проводимых по методу № 6, выполненное по результатам математического эксперимента на моделях, составило $\leq 4 \%$ [25]. В процессе аттестации метода № 7 установлено, что относительная погрешность измерения боковой силы составила 11 %.

Отбор и оборудование железнодорожного подвижного состава. Условия проведения эксперимента. В качестве опытного подвижного состава выбирается из эксплуатации один полувагон на тележках модели 18-100, находящийся в исправном техническом состоянии и загруженный до статической нагрузки на ось 23 тс. Проводится поколесное взвешивание опытного полувагона. Формируется опытный поезд, состоящий из двух электровозов, находящихся в голове и хвосте состава, двух порожних вагонов прикрытия (полувагона или платформы на тележках модели 18-100), опытного полувагона и вагона-лаборатории (рис. 6).

Тележки опытного полувагона оборудуются тензометрическими схемами и датчиками для регистрации рамных сил, углов поворота тележек относительно кузова и колесных пар относительно рамы тележки с учетом «забега» боковых рам тележки. Применяется дополнительное оборудование для идентификации реализаций динамических процессов на вагоне в соответствии с тензометрическими схемами на измерительных сечениях. Для экспериментальной оценки динамических процессов целесообразно использовать

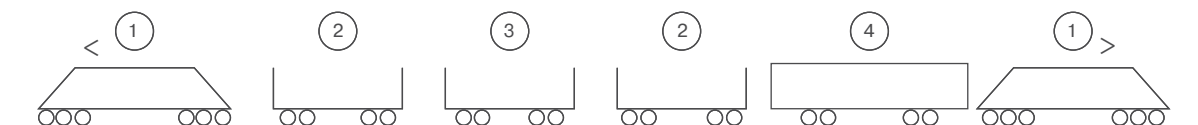


Рис. 6. Схема опытного поезда:

1 — электровоз; 2 — порожний вагон прикрытия; 3 — груженный вагон прикрытия; 4 — вагон-лаборатория

Fig. 6. Diagram of the experimental train:

1 — electric locomotive; 2 — empty cover car; 3 — laden cover car; 4 — laboratory car

лабораторное оборудование и специалистов одного испытательного центра.

Заезды опытного поезда по измерительному участку осуществляются в четном и нечетном направлении со скоростями, обеспечивающими положительные непогашенные ускорения. В пределах каждого i -го измерительного сечения на пути (1, 2, ..., i , ..., l) проводятся опытные поездки в режиме челнока в диапазоне скоростей движения $v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m$ с координатной привязкой реализаций рамных сил к границам каждого измерительного участка пути. Опытные поездки проводятся в течение времени одного «окна», выделенного для испытаний в светлое время суток. Минимальное количество выборочных значений боковых сил, рамных сил и углов поворота для каждой скорости движения, обеспечивающее точность измерения среднего значения наибольших наблюдаемых амплитуд в пределах, установленных типовой методикой испытательного центра (Δ_Y), определяется выражением [26]:

$$N \geq CS^2 / \Delta_Y^2, \quad (16)$$

где S — среднеквадратическое отклонение текущих значений динамического процесса, принимаемое на основании результатов проведенных ранее испытаний близкого по конструкции подвижного состава; C — постоянный множитель, равный 6,25 для доверительной вероятности 0,994.

Обработка динамических процессов с определением F_{yij} , μ_{ij} и $\langle F_y \rangle_{ij}$. Обоснование выбора РМИ. По результатам обработки рамных сил Y_{rij} и углов набегания, относящихся к каждому измерительному сечению на рельсе, в соответствии с выражением (1) с учетом результатов поколесного взвешивания опытного полувагона определяются опорные значения $\langle F_y \rangle_{ij}$.

Реализации боковых сил, зарегистрированные с применением методов № 1–7, обрабатываются статистически с количественной оценкой неопределенности измерения u_a и среднеквадратического отклонения S_x измеряемой величины [8, 27].

В простейшем случае, когда за результат измерения принимают среднее арифметическое значение измеряемой величины и предварительно исключают-

ся систематические погрешности измерений, производится сравнение оценок u_a и S_x с применением выражений [28]:

$$u_a = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}; \quad (17)$$

$$S_x = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n(n-1)},$$

где x_i — текущее значение реализации боковых сил, измеренное по оцениваемой методике; $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение разностей результатов измерений по оцениваемой методике и соответствующих опорных значений, равное $(F_{yij} - \langle F_y \rangle_{ij}) / n$; n — количество измерений по оцениваемой методике после исключения всех выбросов (грубых промахов).

На основании сравнения по выражению (17) количественных значений $\bar{x}$ со значениями $\langle F_y \rangle_{ij}$ по альтернативным методикам формируется суждение о выборе РМИ. По итогам выполненных исследований реализуются подготовительные процедуры по аттестации РМИ порядком, установленным действующим законодательством.

Заключение. Представленный способ определения РМИ боковых сил воздействия колеса на головку рельса по деформациям рельса учитывает требования нормативных документов Росстандарта и может найти применение при экспериментальном оценивании показателей взаимодействия в механической системе «колесо — рельс».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 001/2011: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М., 2011. 66 с.
2. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 002/2011: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. М., 2011. 72 с.
3. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

4. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения / А. Ф. Золотарский [и др.]; под ред. М. А. Чернышева. М.: Транспорт, 1964. С. 261–263.

5. Технические требования к проектируемым локомотивам по условиям прочности, динамики и воздействия на путь. М.: ВНИИЖТ, 1964. С. 10–11.

6. О внесении изменений в Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений»: федер. закон от 21 июля 2014 г. № ФЗ-254 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2014. № 30 (Ч. I). Ст. 4255.

7. ГОСТ Р ИСО 5725–6–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 6. Использование значений точности на практике: дата введения 2002–11–01. М.: Госстандарт России, 2002. 52 с.

8. ГОСТ Р 8.763–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки. Основные положения: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2013–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 20 с.

9. ГОСТ 33760–2016. Железнодорожный подвижной состав. Методы контроля показателей развески: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 мая 2016 г. № 350–ст: дата введения 2017–02–01. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

10. Алексеев Г. М. Исследование зависимости боковых и рамных сил локомотивов // Динамические качества и воздействие на путь локомотивов: сб. ст. М.: Транспорт, 1975. С. 78–84. (Труды ВНИИЖТ; вып. 542).

11. Ромен Ю. С., Тихов М. С. Объем информации для установления допустимых скоростей движения по результатам комплексных испытаний // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: сб. науч. ст. / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2007. С. 87–94.

12. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2016 г. № 856–ст: дата введения 2017–05–01. М.: Стандартинформ, 2017. 48 с.

13. ГОСТ 34451–2018. Моторвагонный подвижной состав. Методика динамико-прочностных испытаний: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2019 г. № 192–ст: дата введения 2019–12–01. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

14. Лужнов Ю. М. Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности). М.: Интекст, 2003. 144 с.

15. Вериги М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 558 с.

16. Завертало А. В. Взаимодействие с рельсовой колеей тележки грузового вагона при износах узлов опирания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М.: ВНИИЖТ, 2002. 23 с.

17. Ромен Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. С. 180–186.

18. Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges // Rêvue Générale des Chemins de Fer. 1987. April. P. 25–32.

19. Решетилов С. И. Воздействие на стрелочные переводы подвижного состава при различных профилях колесных пар: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. М.: ВНИИЖТ, 1987. 19 с.

20. Schlumpf H. Messungen mit Dehungsmeßstreifen bei den SBB // Technische Rundschau. 1955. No. 26. S. 35–41.

21. Влияние вертикальной нагрузки при измерении горизонтальных сил в пути / Э. И. Даниленко [и др.] // Вестник Весоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1979. № 1. С. 41–44.

22. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов // Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути: сб. тр. ЦНИИ МПС. М.: Трансжелдориздат, 1955. С. 289–327.

23. Ершков О. П. Расчет поперечных горизонтальных сил в кривых. М.: Транспорт, 1966. С. 9. (Труды ВНИИЖТ; вып. 301).

24. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10–15.

25. Ромен Ю. С., Суслов О. А., Баляева А. А. Определение сил взаимодействия в системе колесо — рельс на основе измерения напряжений в шейке рельса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 6. С. 354–361. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>.

26. Вериги М. Ф. Применение математической статистики в обработке опытных данных: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: ВНИИЖТ, 1964. С. 111–112.

27. ГОСТ Р ИСО 15193–2007. Изделия медицинские для диагностики in vitro. Измерение величин в пробах биологического происхождения. Описание референтных методик выполнения измерений: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2009–07–01. М.: Стандартинформ, 2008. 20 с.

28. Требования к референтным методикам аналитических измерений в технологических процессах / Р. Ф. Бакеева [и др.] // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 14. С. 104–110.

REFERENCES

1. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR TS 001/2011 [On the safety of railway rolling stock: technical regulations of the Customs Union: TR CU 001/2011]. Approved by decision of the Commission of the Customs Union on July 15, 2011 No. 710. Moscow; 2011. 66 p. (In Russ.).

2. O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR TS 002/2011 [On the safety of high-speed rail transport: technical regulations of the Customs Union: TR CU 002/2011]. Approved by decision of the Commission of the Customs Union on July 15, 2011 No. 710. Moscow; 2011. 72 p. (In Russ.).

3. GOST R 55050–2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnyy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na put' i metody ispytaniy [Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the track and test methods]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2013–07–01. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. 24 p. (In Russ.).

4. Zolotarskiy A. F., Vershinskiy S. V., Ershkov O. P., et al. Zheleznodorozhnyy put' i podvizhnyy sostav dlya vysokikh skorostey dvizheniya [Railway track and rolling stock for high speeds]. Moscow: Transport Publ.; 1964. P. 261–263. (In Russ.).

5. Tekhnicheskie trebovaniya k proektiruемым locomotivam po usloviyam prochnosti, dinamiki i vozdeystviya na put' [Technical requirements for the designed locomotives in terms of strength, dynamics and impact on the track]. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1964. P. 10–11. (In Russ.).

6. O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon "Ob obespechenii edinstva izmereniy" [On Amendments to the Federal Law "On Ensuring the Uniformity of Measurements"]. Federal Law of July 21, 2014 No. FZ-254. *Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii = Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2014;30(1):Art.4255. (In Russ.).

7. GOST R ISO 5725–6–2002. Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Ch. 6. Ispol'zovanie znacheniy tochnosti na praktike [Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Part 6. Use of accuracy values in practice]. Introduction date 2002–11–01. Moscow: Gosstandart Rossii Publ.; 2002. 52 p. (In Russ.).

8. GOST R 8.763–2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki. Osnovnye polozheniya [State system for ensuring the uniformity of

measurements. Multiple direct measurements. Processing methods. Basic provisions]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2013-01-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. 20 p. (In Russ.).

9. GOST 33760–2016. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Metody kontrolya pokazateley razveski [Railway rolling stock. Weighing data control methods]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on May 18, 2016 No. 350-st: introduction date 2017-02-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. 12 p. (In Russ.).

10. Alekseev G. M. Issledovanie zavisimosti bokovykh i ramnykh sil lokomotivov [Investigation of the dependence of lateral and frame forces of locomotives]. Dinamicheskie kachestva i vozdeystvie na put' lokomotivov: sb. st. [Dynamic qualities of locomotives and impact on the rail track: coll. of articles]. Moscow: Transport Publ.; 1975. P. 78–84. (Proceedings of VNIIZhT; issue 542). (In Russ.).

11. Romen Yu. S., Tikhov M. S. Ob"em informatsii dlya ustanovleniya dopustimyykh skorostey dvizheniya po rezul'tatam kompleksnykh ispytaniy [The volume of information for establishing permissible speeds based on the results of complex tests]. Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty: sb. nauch. st. [Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: coll. of scientific articles]. St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2007. P. 87–94. (In Russ.).

12. GOST 33788–2016. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on 19 July, 2016. No. 856-st: introduction date 2017-05-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. 48 p. (In Russ.).

13. GOST 34451–2018. Motorvagonnyy podvizhnoy sostav. Metodika dinamiko-prochnostnykh ispytaniy [Motorized rolling stock. Methods of dynamic-strength tests]. International standard: introduced as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on 15 May, 2019. No. 192-st: introduction date 2019-12-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. 28 p. (In Russ.).

14. Luzhnov Yu. M. Stseplenie koles s rel'sami (priroda i zakonomernosti) [Adhesion of wheels with rails (nature and patterns)]. Moscow: Intext Publ.; 2003. 144 p. (In Russ.).

15. Verigo M. F., Kogan A. Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of the railway and rolling stock]. Moscow: Transport Publ.; 1986. 558 p. (In Russ.).

16. Zavertalyuk A. V. Vzaimodeystvie s rel'sovoy koleey telezhki gruzovogo vagona pri iznosakh uzlov opiraniya [Interaction of a freight car bogie with the rail track during wear of support units]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.22.07. Moscow: VNIIZhT Publ.; 2002. 23 p. (In Russ.).

17. Romen Yu. S. Dinamika zheleznodorozhnogo ekipazha v rel'sovoy kolee. Metody rascheta i ispytaniy [Dynamics of a railway vehicle in a rail track. Methods of calculation and testing]. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. P. 180–186. (In Russ.).

18. Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges. *Révue Générale des Chemins de Fer*. 1987;(April):25-32.

19. Reshetilov S. I. Vozdeystvie na strochnyye perevody podvizhnogo sostava pri razlichnykh profilyakh kolesnykh par [Influence on railroad turnouts of rolling stock with different profiles of wheelsets]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.22.06. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1987. 19 p. (In Russ.).

20. Schlumpf N. Messungen mit Dehungsmeßstreifen bei den SBB. *Technische Rundschau*. 1955;(26):35-41.

21. Danilenko E. I., Ryazanova V. A., Fishman I. I., Sopin V. F. Vliyaniye vertikal'noy nagruzki pri izmerenii gorizontallykh sil v puti [Influence of vertical load when measuring horizontal forces on the way]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1979;(1):41-44. (In Russ.).

22. Ershkov O. P. Ustanovlenie koeffitsientov, uchityvayushchikh bokovoy izgib i kruchenie rel'sov. [Establishment of coefficients accounting for lateral bending and torsion of rails]. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava i voprosy raschetov puti. [Interaction of track and rolling

stock and issues of track calculations]. *Procs. of TsNII MPS*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1955. P. 289–327. (In Russ.).

23. Ershkov O. P. Raschet poperechnykh gorizontallykh sil v krivykh [Calculation of transverse horizontal forces in curves]. Moscow: Transport Publ.; 1966. P. 9. (Proceedings of VNIIZhT; issue 301). (In Russ.).

24. Gapanovich V. A. Voprosy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i infrastruktury pri tyazhelovesnom dvizhenii [Issues of interaction between rolling stock and infrastructure in heavy-haul traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2016;(10):10-15. (In Russ.).

25. Romen Yu. S., Suslov O. A., Balyaeva A. A. Opredeleniye sil vzaimodeystviya v sisteme koleso — rel's na osnove izmereniya napryazheniy v sheyke rel'sa [Determining the force of interaction in a wheel—rail system based on measuring stresses in rails neck]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2017;76(6):354-361. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361>. (In Russ.).

26. Verigo M. F. Primeneniye matematicheskoy statistiki v obrabotke opytnykh dannykh: ucheb.-metod. posobie [Application of mathematical statistics in the processing of experimental data: textbook]. Novosibirsk: NIIZhT Publ.; 1964. P. 111–112. (In Russ.).

27. GOST R ISO 15193–2007. Izdeliya meditsinskoye dlya diagnostiki in vitro. Izmereniye velichin v probakh biologicheskogo proiskhozhdeniya. Opisanie referentnykh metodik vypolneniya izmereniy [Medical products for in vitro diagnostics. Measurement of quantities in samples of biological origin. Description of reference methods for performing measurements]. National standard of the Russian Federation: introduction date 2009-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. 20 p. (In Russ.).

28. Bakeeva R. F., Ryazanova V. A., Fishman I. I., Sopin V. F. Trebovaniya k referentnym metodikam analiticheskikh izmereniy v tekhnologicheskikh protsessakh [Requirements for reference methods of analytical measurements in technological processes]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2015;18(14):104-110. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Александр Менделович БРЖЕЗОВСКИЙ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Нетяговый подвижной состав и автотормозные системы поездов», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 700436, <https://orcid.org/0000-0003-3294-9723>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander M. BRZHEZOVSKIY,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Centre for Non-Traction Rolling Stock and Automatic Train Brake Systems, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 700436, <https://orcid.org/0000-0003-3294-9723>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

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

Статья поступила в редакцию 05.03.2022, первая рецензия получена 08.04.2022, вторая рецензия получена 29.04.2022, принята к публикации 27.05.2022.

The article was submitted 05.03.2022, first review received 08.04.2022, second review received 29.04.2022, accepted for publication 27.05.2022.

Научная статья

УДК 629.4.027.4:656.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124

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



ДВУХСЛОЙНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ШАРНИРЫ И ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. С. Космодамианский¹✉, В. И. Воробьев²,
О. В. Измеров², Д. Н. Шевченко¹, Д. Ю. Расин²

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

²Брянский государственный технический университет (БГТУ),
Брянск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье анализируется проблема методов расчета характеристик сферических резинометаллических шарниров. Рассмотрена верифицированная расчетная схема для определения жесткостных характеристик сферических резинометаллических шарниров — как однослойных, так и двухслойных.

Материалы и методы. Для определения характеристик сферического резинометаллического шарнира использовано компьютерное моделирование с помощью метода конечных элементов. Обоснована возможность пренебречь в ходе моделирования деформацией металлических деталей шарнира, что позволило упростить расчетную схему. Предложена методика учета влияния предварительного сжатия упругого слоя, определены значения радиальной жесткости для однослойных и двухслойных резинометаллических шарниров при различной твердости материалов, совпадающие с результатами эксперимента.

Результаты. Установлено, что с уменьшением толщины резинового слоя при оценке жесткости шарнира на ее характеристики существенно влияет точность задания коэффициента Пуассона. Достигнута удовлетворительная сходимость результатов моделирования радиальной жесткости шарнира и экспериментальных исследований при значении коэффициента Пуассона, равном 0,499999 (расхождение около 5%, что меньше технологического разброса жесткости при изготовлении). Установлено, что жесткость двухслойных резинометаллических шарниров, аналогичных по габаритам и компенсационной способности применяемым в конструкции отечественных локомотивов, должна быть в 6,3 раза выше, чем для существующих однослойных, что позволит уменьшить деформацию резины при воздействии нагрузок в эксплуатации и тем самым решить известные проблемы с надежностью узлов подвески тяговых электродвигателей.

Обсуждение и заключение. В связи с тем, что форма свободной поверхности боковых граней двухслойных резинометаллических шарниров до сборки должна иметь малые радиусы кривизны выемок, необходимы дальнейшие исследования для выбора рациональной геометрии свободной поверхности боковых граней. На предложенные решения по конструкции и технологии изготовления двухслойных резинометаллических шарниров получен патент на полезную модель.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тяговый привод локомотива, сферический резинометаллический шарнир, надежность, конструирование

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

Для цитирования: Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Шевченко Д. Н., Расин Д. Ю. Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 114–124. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124>.

✉ askosm@mail.ru (А. С. Космодамианский)

© Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В., Шевченко Д. Н., Расин Д. Ю., 2022

Original article

UDK 629.4.027.4:656.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124

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



TWO-LAYER SPHERICAL RUBBER-METAL JOINTS AND PROBLEMS OF THEIR CALCULATION FEATURES

Andrey S. Kosmodamianskiy¹✉, Vladimir I. Vorob'ev²,
Oleg V. Izmerov², Dmitriy N. Shevchenko¹, Dmitriy Yu. Rasin²

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article analyses the methods for calculating the characteristics of spherical rubber-metal joints. The authors consider a verified calculation model for determining the stiffness characteristics of spherical rubber-metal joints, both single-layer and double-layer.

Materials and methods. The researchers used computer modelling and the finite element method to determine the features of the spherical rubber-metal joints. The possibility of neglecting the deformation of the metal parts of the joint for the modelling purposes was substantiated, which enabled to simplify the calculation model. Moreover, the authors proposed the method for measuring the effect of the elastic layer precompression and determined the values of radial stiffness for single-layer and double-layer rubber-metal joints at different hardness of materials, which coincided with the experimental results.

Results. As a result, the authors revealed that with a decrease in the thickness of the rubber layer by assessing the rigidity of the joint, its features were significantly affected by the accuracy of setting the Poisson's ratio. A satisfactory convergence of the radial stiffness of the joint found through the modelling and experimental studies was achieved at a Poisson's ratio equal to 0.499999 (the discrepancy is about 5%, which is less than the technological spread of rigidity during manufacture). The authors also found out that the rigidity of two-layer rubber-metal joints, similar in size and compensatory capacity to those used in the design of domestic locomotives, should be 6.3 times higher than for existing single-layer ones. Such features would reduce the deformation of rubber by loads exposure during operation and thereby would solve the problems with the reliability of traction motors suspension units.

Discussion and conclusion. Due to the fact that the shape of the free surface of the side faces of two-layer rubber-metal joints before assembly should have small radii of the recesses curvature, further research is needed to select the rational geometry of the free surface of the side faces. The researchers got a utility model patent for the proposed design and manufacturing technology of two-layer rubber-metal joints.

KEYWORDS: locomotive traction drive, spherical rubber-metal joint, reliability, design

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

For citation: Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Izmerov O. V., Shevchenko D. N., Rasin D. Yu. Two-layer spherical rubber-metal joints and problems of their calculation features. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):114-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-114-124>.

✉ askosm@mail.ru (A. S. Kosmodamianskiy)

© Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Izmerov O. V.,
Shevchenko D. N., Rasin D. Yu., 2022

Объект исследования и описание проблемы. В узлах экипажной части современных локомотивов все большее применение находят сферические резинометаллические шарниры (РМШ), у которых, в отличие от ранее используемых цилиндрических, при угловом перекосе в сферическом резиновом слое возникают только деформации сдвига; при этом фактор формы, определяемый соотношением площади сечения поверхности, воспринимающей радиальную нагрузку, к площади свободной поверхности резинового слоя [1], для сферического РМШ выше, чем для цилиндрического. В результате при одинаковых наружных размерах и допустимом угле поворота сферический РМШ может выдержать более высокую нагрузку.

В ходе эксплуатации отечественных сферических РМШ на локомотивах 2ЭС6 и 2ТЭ25А имели место случаи выхода их из строя в виде выдавливания резиновой втулки [2, 3] в узлах подвески тяговых электродвигателей (ТЭД). В ранее опубликованных статьях была обоснована целесообразность применения двухслойных сферических резинометаллических шарниров с промежуточной арматурой, которые, по предположению авторов, должны иметь примерно в 4 раза более высокую нагрузочную способность без ухудшения компенсирующей способности [4, 5]. Основным препятствием для применения таких шарниров является отсутствие методов их расчета и проектирования. В настоящей статье предпринята попытка решения данной проблемы.

Анализ существующих методов расчета и проектирования сферических шарниров. В известных справочно-методических изданиях [1, 6] был рассмотрен расчет цилиндрических РМШ, в [7, 8] — плоских резинометаллических амортизаторов. В [9] рассмотрен расчет шарового резинометаллического подпятника, однако приведенные там формулы не могут быть использованы для расчета сферического РМШ. В 1980-х гг. во ВНИИЖТ были проведены работы по созданию поводковой подвески для ТЭД и осевых редукторов, в которых принимал участие О. В. Измеров, один из авторов настоящей статьи. В результате [10, 11] были предложены следующие формулы для определения жесткости сферических РМШ.

Радиальная жесткость, кН/мм:

$$C_p = 6\pi GR_1 \frac{\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-1} - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^4}{5 - 4,5 \left[\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-2} \right] + 2 \left[\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^3 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-3} \right]}, \quad (1)$$

где G — модуль сдвига, МПа; R_1 — радиус сферы наружной обоймы, мм; R_2 — радиус сферы внутренней обоймы, мм.

Жесткость на сдвиг (скручивание), кН·м/рад:

$$C_\tau = 3,2\pi GR_1^3 \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 - 1 \right]. \quad (2)$$

При этом в [10] при расчете по формуле (1) величина R_2 принималась уменьшенной на величину радиального поджатия резины при сборке шарнира, в [11] это уточнение не делалось.

Как видно из формул (1) и (2), в них не учитывается такой важный параметр, как угол раскрытия резинового элемента α , определяемый вертикальной осью симметрии шарнира и прямой, проходящей через центр шарнира и точку, условно принимаемую за границу резинового элемента. В изготовленных во ВНИИЖТ опытных РМШ, способ сборки которых запатентован в [12], была принята величина $\alpha = \pi/4$.

В табл. 1 приведены сравнительные данные расчетных и экспериментальных жесткостей некоторых сферических РМШ локомотивов с близкими величинами α . Указанные выше формулы неприменимы для РМШ с другим значением α .

Установлено [10, 11], что радиальная жесткость шарниров в 1,5–1,9 раза выше в случае, если при установке шарнира происходит смыкание краев выемок резинового элемента по краям сегментов или колец, из которых состоит наружная обойма. В [12] запатентована форма выемки для шарнира с осевым разъемом, которая определяется соотношением, найденным путем аппроксимации результатов моделирования с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для вариантов с наименьшими величинами деформаций растяжения:

$$B = \frac{2h\Delta_p}{\sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{8}{3} \frac{\delta}{R \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где B — ширина выемки на расстоянии δ от плоскости, параллельной продольной оси шарнира и касательной к обеим сферическим поверхностям колец, мм; R — радиус наружной сферической поверхности элемента, мм; h — толщина резинового элемента, мм; Δ_p — предварительная радиальная деформация резины, относительная величина, $\Delta_p \leq 0,5$. Однако для РМШ, применяемых на электровозе 2ЭС6 и тепловозе 2ТЭ25А, использована форма выемки в виде двух конусов со значительным (2 мм, или 20 % от толщины резинового слоя) радиусом скругления дна выемки, что при монтаже шарнира может привести к образованию в месте скругления кольцевой полости и снижению радиальной жесткости шарнира.

Таблица 1

Сравнительные данные расчетных и экспериментальных жесткостей
некоторых сферических РМШ подвески ТЭД (или осевого редуктора) локомотивов

Table 1

Comparative data of calculated and experimental stiffnesses of some spherical
rubber-metal joints of the traction motor (or axial reduction unit) locomotives suspension

Серия	G , мПа	R_1 , мм	R_2 , мм	Твердость резины по Шору А, ед.	C_p , кН/мм, расчет	C_p , кН/мм, опыт	C_τ , кН·м/рад, расчет	C_τ , кН·м/рад, опыт
2ТЭ10М опытный	1,15	80	60	—	100,3 [10]	100	8,0	8,6
2ТЭ121 опытный	1,4	64	55	—	190 [11]	180	2,6	—
2ТЭ25А, 2ЭС6	1,5–2,05	55	45	70–80	97–133	92	—	—

Основным недостатком РМШ с осевым разъемом является то, что радиальный предварительный натяг резинового элемента при монтаже достигается косвенным путем (за счет деформации сдвига), при этом деформация сдвига принимается равной утроенной предварительной деформации сжатия. Для шарниров подвески ТЭД локомотивов 2ТЭ25А и 2ЭС6 эта деформация равна 3 мм, что соответствует углу перекося $\nu = 0,054545$ рад. Касательные напряжения в резине в месте вулканизации без учета выдавливания излишков резины в стороны от выемки можно определить по формуле, приведенной в [10]:

$$\tau = 3\nu G R_1^3 R_2^{-3} \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 - 1 \right], \quad (4)$$

где при $G = 2,05$ мПа получаем $\tau = 2,8$ МПа.

Как указано в [4], для деталей с фактором формы более 1,5 прочность шарнира в целом начинает лимитироваться прочностью соединения резины с металлом. Согласно [13] прочность соединения резины из синтетических каучуков с металлом с помощью клея «Лейконат» для разных резиновых смесей может колебаться от 3 до 10 МПа. Таким образом, для сферических РМШ с осевым разъемом важно обеспечить максимально прочное соединение резины с металлическими обоймами (латунирование, дробеструйная обработка поверхностей и т.п.). Как показала практика, характерным дефектом сферических РМШ подвески ТЭД локомотивов ЭП1, 2ЭС6, 2ТЭ25А является отслоение резинового элемента от наружной обоймы и выдавливание резины за торец поводка [3, 14, 15].

Для трехсегментных РМШ, производимых зарубежными фирмами, величина зазоров между сегментами обоймы перед монтажом составит

$$\Delta = \frac{2}{3} \pi \Delta_p (R_1 - R_2). \quad (5)$$

Для РМШ подвески ТЭД локомотивов 2ТЭ25А и 2ЭС6 $\Delta = 2,09$ мм, что почти втрое меньше величины зазора в РМШ с осевым разъемом. Недостаток трехсегментных шарниров заключается в повышенной сложности монтажа. Поскольку сферические шарниры в экипажной части локомотивов применяются, как правило, в деталях, нагруженных осевым усилием (например, в буксовых поводках), это позволяет для упрощения использовать двухсегментные шарниры с разъемом в плоскости, перпендикулярной оси поводка, описанные в [4].

В двухсегментных РМШ предварительная деформация резинового слоя, как и в трехсегментных, достигается путем радиального сжатия резинового слоя в направлении действия нагрузки, поэтому величина зазоров между сегментами обоймы перед монтажом составит

$$\Delta = 2\Delta_p (R_1 - R_2). \quad (6)$$

Для РМШ подвески ТЭД локомотивов 2ТЭ25А и 2ЭС6 $\Delta = 2$ мм, что тоже втрое меньше величины зазора в РМШ с осевым разъемом. Это позволяет упростить форму выемки. Меньшая ширина выемки приводит к меньшим возможным объемам избыточной резиновой массы при смыкании разъема.

В связи с тем, что изложенная методика, обеспечивающая достаточную сходимость с результатами эксперимента, охватывает только случаи однослойных РМШ с продольным разъемом и величиной $\alpha = \pi/4$, авторами была предпринята попытка использовать в качестве универсального инструмента расчета МКЭ.

Моделирование шарнира с помощью МКЭ. Исследование жесткостных свойств однослойного и двухслойного РМШ. В качестве моделируемого объекта был принят сферический РМШ, соответствующий примененному в подвеске ТЭД электровоза 2ЭС6 и тепловоза 2ТЭ25А (см. табл. 1), и двухслойный двухсегментный сферический РШМ, предложенный в [4], плоскость разъема которого расположена перпендикулярно оси поводка, с теми же параметрами и толщиной промежуточной арматуры 1 мм. Исходя из положения, что при проектировании шарнира его форма до сборки для достижения наивысшей нагрузочной способности должна обеспечить смыкание выемок резинового элемента по краям полуколец, РМШ рассматривался как совокупность полных металлических и резиновых колец, жестко соединенных между собой. В качестве препостпроцессора при моделировании шарнира использовался модуль Advanced Simulation комплекса Siemens PLM NX. При построении геометрии в главном эскизе (рис. 1) был заранее предусмотрен средний слой, который в зависимости от назначенного элементу материала может моделировать как резиновую втулку, так и промежуточную арматуру. На основе геометрии эскиза построено пять твердых тел вращения с углом поворота 360° .

Разбиение объемной геометрии осуществлялось восьмиузловыми гексаэдральными объемными конечными элементами с применением условия совпадения сеток на контактирующих поверхностях разбиваемых тел. Для металлических элементов принят

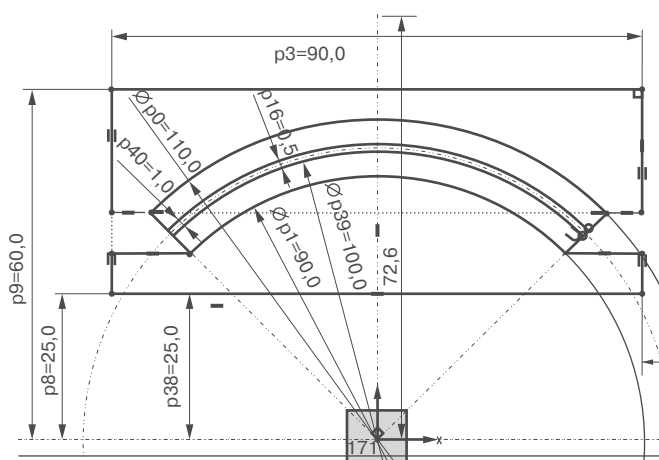


Рис. 1. Главный эскиз для построения геометрической модели шарнира:

p_0 , p_1 , p_3 и т. д. — переменные, содержащие значения управляющих размеров при параметрическом твердотельном моделировании

Fig. 1. Main draft for constructing a geometric model of the joint:

p_0 , p_1 , p_3 , etc. — variables of the values control dimensions in parametric solid modelling

материал Сталь 20 с параметрами: модуль упругости $E = 210\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. На основании экспериментальных данных, приведенных в [10, 11], для моделирования резины применена упругая линейная модель материала, обладающего изотропными свойствами (одинаковыми параметрами жесткости во всех трех направлениях). Согласно графику зависимости модуля упругости резины от твердости, представленному в [16], были определены значения статического модуля упругости для резины с твердостью по Шору А 60, 65, 70, 75, 80 ед. Для анализа радиальной жесткости РМШ расчетная схема была дополнена соединением одномерных абсолютно жестких элементов, соединяющих все узлы внутреннего кольца с центральной точкой, расположенной на оси шарнира, к которой будут прикладываться соответствующие ограничения и которой будет задаваться вынуждающее перемещение. Данное решение приводит к следующим упрощениям:

- посадочная поверхность внутреннего кольца шарнира не деформируется;
- усилие от цилиндрического соединительного пальца распределяется по всей внутренней поверхности кольца, а не только по его нижней части.

К поверхности внешнего кольца прикладывается ограничение «жесткая заделка», что приводит к тому, что сила реакции от действующей радиальной силы распределяется по всей поверхности внешнего кольца, исключается смещение узлов поверхности кольца относительно охватывающей шарнир поверхности подвески, а также возможность проворота шарнира.

В узел соединения вводится ограничение на все степени свободы и задается вынуждающее перемещение, равное 1 мм. По результату расчета проводится оценка величины силы реакции в данном узле при единичном смещении. Согласно зависимости $C = P / f$ значение полученного усилия будет равно радиальной жесткости шарнира.

Результат предварительного расчета показал, что относительные перемещения в узлах металлических частей и возникающие в них усилия ничтожно малы, поскольку жесткость металла на несколько порядков больше, чем у резины. Данное обстоятельство позволило ввести допущение, что все деформации шарнира обусловлены работой резинового слоя, и упростить расчетную схему, пренебрегая деформацией металлических частей. Это дало возможность отказаться от расчета металлических частей шарнира и, соответственно, от разбиения на конечные элементы, полагая их абсолютно жесткими связями. Уменьшение количества элементов и узлов сократило число узловых степеней свободы и, следовательно, число неизвестных, что привело к снижению размерности решаемой задачи. Данное решение позволило при необходимости уменьшить шаг конечно-элементной

сетки без значительного увеличения объема вычислений. Поскольку результаты расчета при данном упрощении оказались практически идентичны результатам для описанной выше модели, для дальнейших исследований использовалась схема, моделирующая только резиновый слой (рис. 2).

Результаты расчета для разной твердости по Шору А представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что значения радиальной жесткости, полученные для однослойного шарнира, не соответствуют экспериментальным данным — 92 кН/мм при твердости резины по Шору А 70–80 ед. Погрешность составила 43 %, что говорит о необходимости корректировки исходных данных и параметров расчетной схемы.

Проведенное исследование показало, что наличие предварительного сжатия оказывает несущественное влияние на радиальную жесткость шарнира. При этом проверочные расчеты на упрощенных моделях показали, что с уменьшением толщины резинового слоя при оценке жесткости шарнира на ее характеристики существенно влияет точность задания коэффициента Пуассона. В исходных расчетах данный коэффициент принимался близким к величине 0,5 и составлял $\mu = 0,49$. Для оценки влияния точности задания коэффициента Пуассона от толщины резинового слоя была создана конечно-элементная модель резинового образца, представляющего собой параллелограмм с длиной и шириной основания 100 мм и переменной высотой H (рис. 3).

Узлы основания закреплены по всем шести степеням свободы. Узлы верхней грани соединены между собой абсолютно жесткими связями. Всем узлам верхней грани сообщается единичное перемещение $\Delta H = 1$ мм.

В результате расчета определялась суммарная сила реакции в заделках узлов основания, оценивалась жесткость для разных вариантов представления величины коэффициента μ . В первом варианте значение, приближенное к величине $\mu = 0,5$, составило $\mu = 0,49$, во втором варианте $\mu = 0,499999$. Для обоих вариантов значение модуля упругости принималось $E = 4$ МПа.

По результатам анализа построен сводный график зависимости жесткости образца от высоты H (рис. 4)

Как видно из графика, при толщине резинового слоя меньше 20 мм резко начинает возрастать погрешность при определении жесткости элемента. Так, при высоте 10 мм значение жесткости при уточненном значении μ оказалось выше в 2,7 раза по сравнению с коэффициентом, округленным до сотых. Учитывая эти результаты, произведен пересчет значений радиальной жесткости для РМШ. Полученные значения приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, значения радиальной жесткости, полученные для однослойного шарнира, при уточнении коэффициента Пуассона оказываются приближены к экспериментальным данным

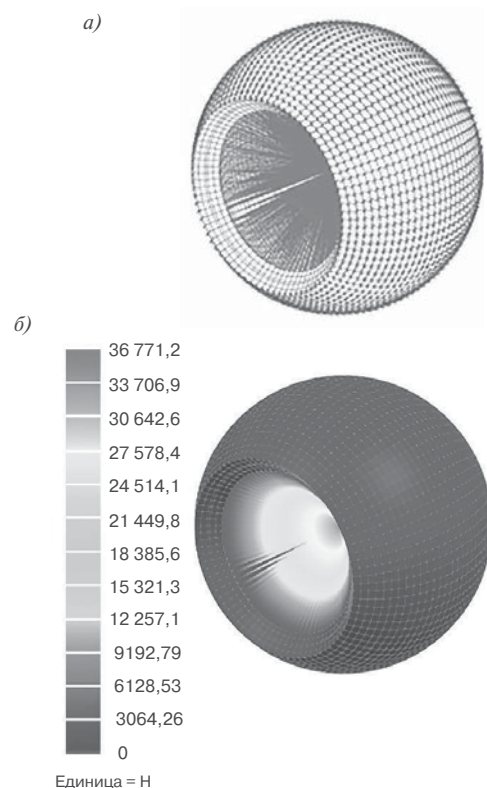


Рис. 2. Резиновая втулка:
а — расчетная схема; б — результаты расчета, радиальная жесткость — 36,8 кН/мм

Fig. 2. Rubber grommet:
а — calculation model; б — calculation results, radial stiffness — 36.8 kN/mm

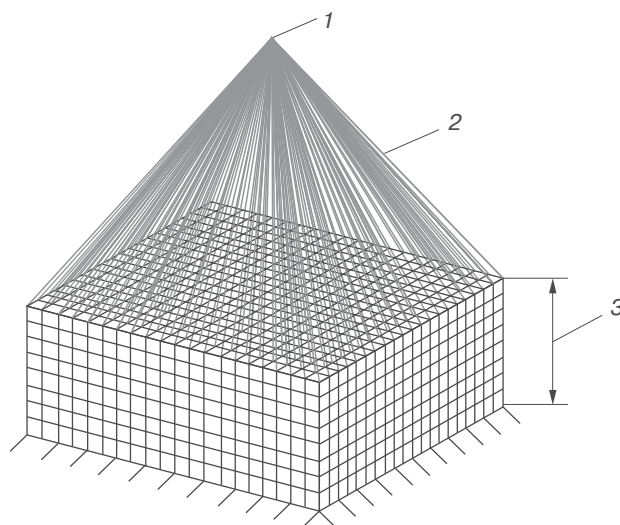


Рис. 3. Расчетная схема резинового образца:
1 — перемещаемый узел; 2 — абсолютно жесткая связь;
3 — высота образца H

Fig. 3. Calculation model of the rubber sample:
1 — moving node; 2 — absolutely rigid connection;
3 — H sample height

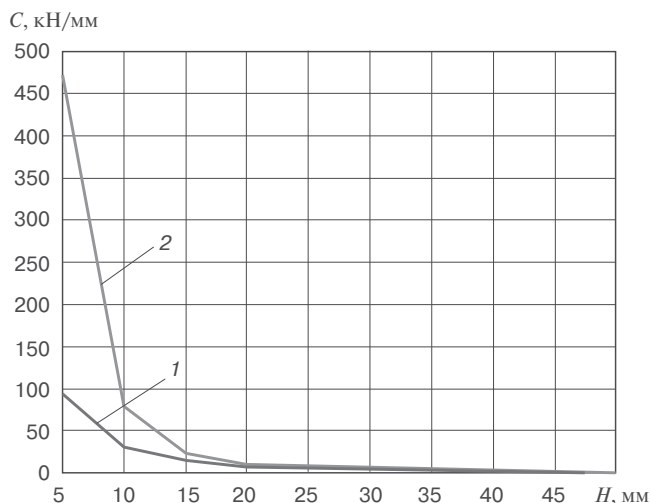


Рис. 4. График зависимости расчетной величины жесткости резинового элемента от его высоты:
1 — $\mu = 0,49$; 2 — $\mu = 0,499999$

Fig. 4. Graph of the dependence for the calculated value of the rubber element rigidity on its height:
1 — $\mu = 0.49$; 2 — $\mu = 0.499999$

(92 кН/мм при твердости резины по Шору А 70–80 ед.), для среднего значения твердости 75 ед. расхождение составило около 5%, что существенно меньше, чем возможный разброс жесткости шарнира при изготовлении. При этом радиальная жесткость двухслойного шарнира оказалась примерно в 6,3 раза выше

однослойного, что как минимум подтверждает первоначальные прогнозы о существенно более высокой несущей способности двухслойных шарниров по сравнению с однослойными. С другой стороны, существенно более высокая радиальная жесткость двухслойных РМШ требует при проектировании тягового привода учитывать изменение упруго-диссипативных свойств динамической системы и изменение частот собственных колебаний, при необходимости предусматривая введение в конструкцию упругих элементов для амортизации ударных и вибрационных нагрузок.

Исследование деформаций свободной поверхности РМШ. Важным вопросом при проектировании РМШ является выбор формы свободной поверхности резиновой втулки перед предварительным деформированием при сборке. Предварительное деформирование необходимо для того, чтобы в резиновой втулке под действием эксплуатационных нагрузок не возникало деформаций растяжения, резко снижающих долговечность детали. При этом свободной поверхности втулки перед сборкой шарнира придают такую форму, чтобы после сборки на ней не образовалось выпучиваний, в которых появятся деформации растяжения.

Поиск искомой формы свободной поверхности производился путем решения обратной задачи: в качестве исходной была принята форма свободной поверхности РМШ после монтажа, представляющая собой коническую поверхность, а искомая форма поверхности до монтажа образовывалась за счет растяжения

Таблица 2

Результаты расчета радиальной жесткости РМШ при относительной радиальной деформации $\Delta H = 1$ мм

Table 2

Results of calculating the radial stiffness of the rubber-metal joint at a relative radial deformation $\Delta H = 1$ mm

Тип шарнира по виду упругой втулки	Твердость по Шору А, ед.	E , МПа	Сила реакции P_p , кН	Радиальная жесткость C_p , кН/мм
Однослойный	60	2,7	24,28	24,28
	65	3,18	28,59	28,59
	70	3,8	34,17	34,17
	75	4,64	41,72	41,72
	80	5,86	52,68	52,68
Двухслойный	60	2,7	39,93	39,93
	65	3,18	47,03	47,03
	70	3,8	56,19	56,19
	75	4,64	68,59	68,59
	80	5,86	86,6	86,6

Таблица 3

Расчетные значения радиальной жесткости для однослойного и двухслойного РМШ при относительной радиальной деформации $\Delta H = 1$ мм и $\mu = 0,499999$

Table 3

Calculated values of radial stiffness for a single layer and a two-layer rubber-metal joint with a relative radial deformation $\Delta H = 1$ mm and $\mu = 0.499999$

Тип шарнира по виду упругой втулки	Твердость по Шору А, ед.	E , МПа	Сила реакции P_p , кН	Радиальная жесткость C_p , кН/мм
Однослойный	60	2,7	56,17	56,17
	65	3,18	66,15	66,15
	70	3,8	79,05	79,05
	75	4,64	96,52	96,52
	80	5,86	121,9	121,9
Двухслойный	60	2,7	359,85	359,85
	65	3,18	421,68	421,68
	70	3,8	504,63	504,63
	75	4,64	616,22	616,22
	80	5,86	776,59	776,59

резинового элемента на величину предварительной деформации в направлении, противоположном перемещению арматуры при монтаже.

Для упрощения решения задачи по получению формы свободной поверхности создано два сегмента упругой втулки, представляющие собой половину ее полукольца. Шаг разбивки конечно-элементной сетки из условия получения ряда элементов на свободной грани составил 1 мм. Внутреннее кольцо абсолютно жестко заделано. На грани разреза по плоскости симметрии накладываются симметричные связи. Узлам внешней поверхности наружного кольца сообщается перемещение в 1,5 мм (из условия, что первоначальный зазор между смыкаемыми полукольцами равен 3 мм). Внешний вид расчетной схемы представлен на рис. 5. Как и в предыдущем случае, модель двухслойного шарнира создается на базе однослойной модели путем увеличения жесткости среднего слоя элемента до значений жесткости стали.

Для моделирования резинового слоя принят материал, имеющий параметры твердости по Шору А — 60 ед., статический модуль упругости $E = 2,7$ МПа, $\mu = 0,499999$.

Получившаяся в результате расчета деформированная поверхность будет оптимальна для достижения условия получения ровной свободной поверхности при смыкании полуколец при сборке шарнира.

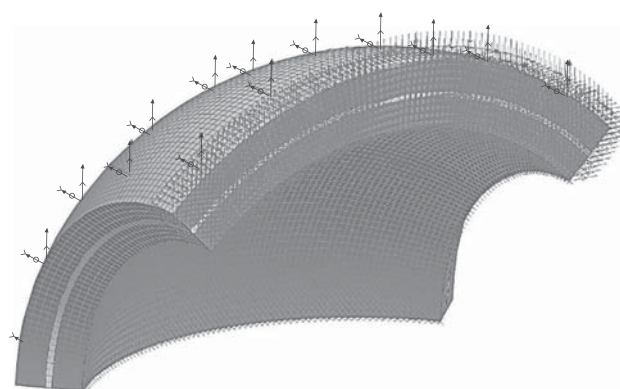


Рис. 5. Расчетная схема втулки при моделировании деформации свободных поверхностей резинового слоя

Fig. 5. Calculation model of the grommet by modelling the deformation of the rubber layer free surfaces

На рис. 6 и 7 показана деформированная свободная поверхность резинового элемента, применяемого в однослойном и двухслойном РМШ соответственно.

Как видно из рис. 7, для двухслойного шарнира характерна меньшая глубина требуемой выемки, однако при этом значительно уменьшаются радиусы при вершине выемки. Это обусловлено снижением возможности перемещения резины в двухслойном шарнире по сравнению с однослойным, что создает

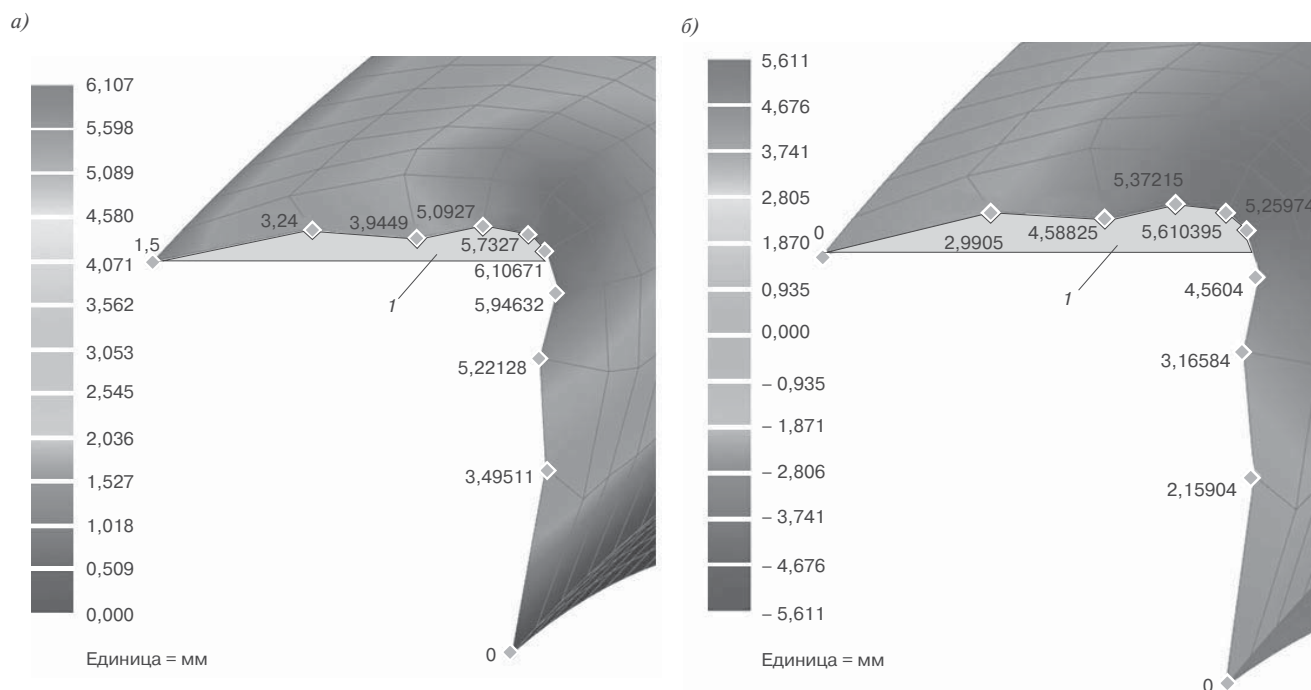


Рис. 6. Перемещения узлов свободной поверхности втулки однослойного шарнира: а — в вертикальном направлении; б — в горизонтальном направлении: 1 — поднутрения

Fig. 6. Nodes shifting of the free surface of the grommet of a single-layer joint: а — in the vertical direction; б — in the horizontal direction: 1 — undercuts

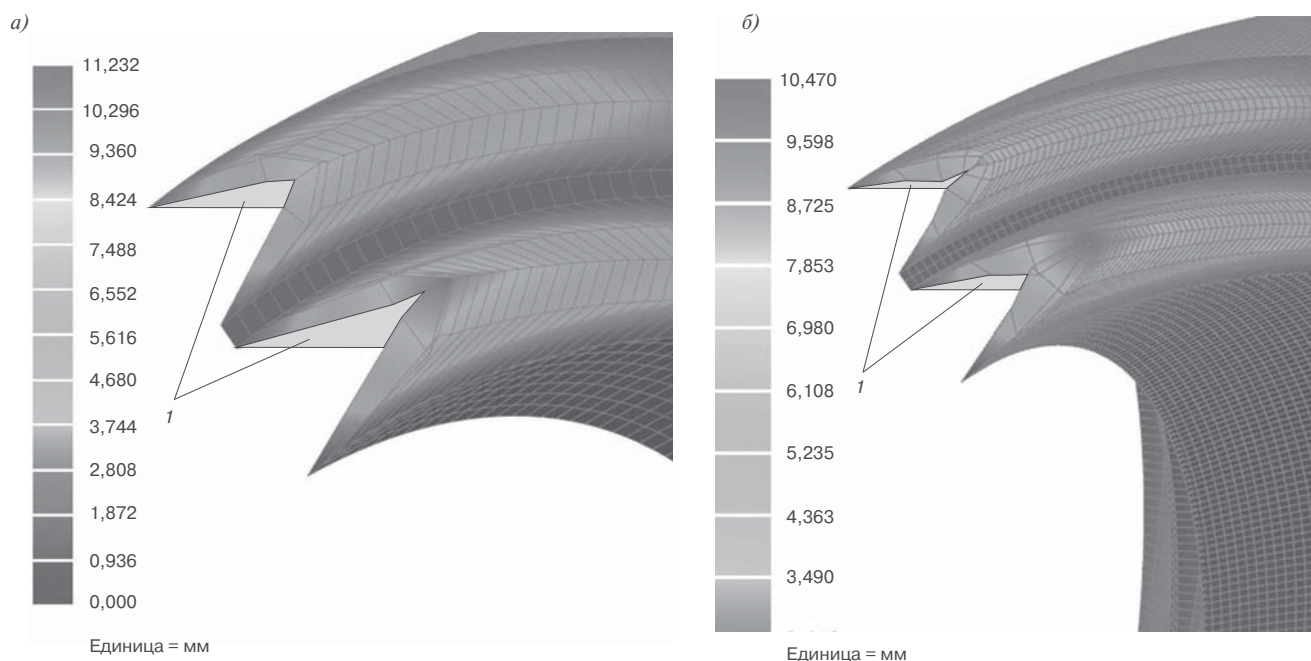


Рис. 7. Перемещения узлов свободной поверхности резинового элемента двухслойного шарнира при разной величине конечных элементов: *а* — при шаге разбивки конечно-элементной сетки 1 мм; *б* — при шаге разбивки конечно-элементной сетки 0,5 мм; 1 — поднутрения

Fig. 7. Nodes shifting of the free surface of the rubber element of a two-layer joint with different sizes of finite elements: *a* — with a spacing step of the finite element mesh of 1 mm; *б* — with a spacing step of the finite element mesh of 0.5 mm; 1 — undercuts

условия для образования локальных зон растяжения на середине свободной поверхности после сборки шарнира. Возможно, по этой причине потребуется снижение максимальных радиальных деформаций резинового слоя при работе. Данный вопрос требует дальнейших исследований.

Из сказанного следует, что при проектировании двухслойных РМШ одной из основных проблем является обеспечение возможности разъема деталей литьевой или плунжерно-литьевой прессформы, которая, как видно из рис. 6 и 7, должна обеспечивать внутренние кольцевые поднутрения. В связи с этим авторами была предложена конструкция двухслойного сферического РМШ с разъемом, упрощающая технологию изготовления, на которую получен патент на полезную модель [17].

Заключение. Установлено, что для сферических РМШ в настоящее время известна методика расчета только для однослойных с $\alpha = \pi/4$, обладающая достаточной сходимостью с результатами эксперимента при продольном разъеме шарнира, что недостаточно для создания новых конструкций этого узла, в частности двухслойных с промежуточной арматурой, имеющих более высокую нагрузочную способность по сравнению с однослойными.

В процессе исследования получена верифицированная расчетная схема для определения жесткостных параметров однослойных и двухслойных РМШ. Сопостав-

ление результатов расчета характеристик однослойных и двухслойных РМШ, аналогичных применяемым в тяговых приводах отечественных локомотивов, показало, что двухслойный шарнир имеет жесткость в радиальном направлении, в 6,3 раза превышающую жесткость однослойного шарнира, что позволяет создать шарниры, обеспечивающие надежную работу узла подвески ТЭД электровозов 2ЭС6 и тепловозов 2ТЭ25А.

Установлено, что форма свободной поверхности боковых граней двухслойного РМШ до сборки должна иметь малые радиусы кривизны выемок, при том что это может приводить к возникновению деформаций растяжения на гранях после сборки шарнира, снижая его надежность. Вопрос выбора оптимальной геометрии свободной поверхности боковых граней двухслойного РМШ требует дальнейшего изучения.

На предложенные решения по конструкции и технологии изготовления двухслойного РМШ получен патент на полезную модель.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Потураев В. Н. Резиновые и резиноталлические детали машин. М.: Машиностроение, 1966. 299 с.
2. Корнев А. М., Липунов Д. В. Модернизация системы подвешивания ТЭД электровоза постоянного тока 2ЭС6 // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы Третьей Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Омск, 10–11 ноября 2016 г.) / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2016. С. 237–242.

3. Алексеева М.С. Анализ работы тепловозов серии 2ТЭ25А «Витязь» на Дальневосточной железной дороге // Технические науки — от теории к практике: сб. статей по материалам LVIII Междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 25 мая 2016 г.). Новосибирск: СибАК, 2016. Ч. II. С. 61–66.
4. Поиск новых путей повышения надежности узла подвески тяговых электродвигателей / А.С. Космодамианский [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2019. Т. 78, № 6. С. 19–26.
5. Анализ рациональности конструкции подвески тягового электродвигателя магистрального тепловоза с повышенной нагрузкой на ось / А.С. Космодамианский [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2021. Т. 87, № 3. С. 22–27.
6. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
7. Лепетов В.А. Расчеты и конструирование резиновых технических изделий и форм. Л.: Химия, 1971. 312 с.
8. Применение резиновых технических изделий в народном хозяйстве: справ. пособие / под ред. Л.Д. Федюкина. М.: Химия, 1986. 240 с.
9. Вибрации в технике: справ. В 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
10. Исследования по созданию подвески тягового электродвигателя со сферическими резинометаллическими шарнирами для тепловозов с опорно-осевым приводом. Заключительный отчет: ВНИТИ И-17-85. Коломна, 1985. 55 с.
11. Результаты стендовых испытаний подвесок редуктора тягового привода тепловоза 2ТЭ121. Заключительный отчет: ВНИТИ И-101-87. Коломна, 1987. 68 с.
12. Авторское свидетельство № 1493807 СССР, МПК F16C 11/06. Способ сборки резинометаллического сферического шарнира: № 4272700/25-27: заявл. 04.05.87: опубл. 15.07.89 / Коссов В.С. [и др.]. 5 с.
13. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин [и др.]. М.: Машиностроение, 2013. 245 с.
14. Соколов Ю.Н., Пономарев А.С., Дегтярев В.Е. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 // Локомотив информ. 2010. № 6. С. 4–11.
15. Ахмадеев С.Б., Корнев А.М. Анализ повреждений механической части электровозов нового поколения в эксплуатации (на примере 2ЭС6) // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Омск, 10–11 декабря 2015 г.): в 3 ч. / под ред. И.И. Галиева; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2015. Ч. 1. С. 203–208.
16. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резиновых изделий. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1977. 408 с.
17. Патент № 202196 Российская Федерация, МПК F16C 11/06 (2006.01). Сферический резинометаллический шарнир: № 2020121555: заявл. 29.06.2020: опубл. 05.02.2021 / Воробьев В.И. [и др.]. 8 с.
- diesel locomotives of the 2TE25A Vityaz series on the Far Eastern Railway]. Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike [Technical sciences — from theory to practice]. Procs. of LVIII Int. conf. (Novosibirsk, May 25, 2016). Novosibirsk: SibAK Publ.; 2016. Part II. P. 61–66. (In Russ.).
4. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Izmerov O. V., et al. Poisk novykh putey povysheniya nadezhnosti uzla podveski tyagovykh elektrodvigately [Search for new ways to improve the reliability of the suspension unit of traction electric motors]. Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of transport of the Volga region. 2019;78(6):19-26. (In Russ.).
5. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Izmerov O. V., et al. Analiz ratsional'nosti konstruktssii podveski tyagovogo elektrodvigatelya magistral'nogo teplovoza s povyshennoy nagruzkoy na os' [Analysis of the rationality of the design of the suspension of the traction electric motor of the main diesel locomotive with increased axle load]. Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of transport of the Volga region. 2021;87(3):22-27. (In Russ.).
6. Poturaev V. N., Dyrda V. I. Rezinovye detali mashin [Rubber parts of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1977. 216 p. (In Russ.).
7. Lepetov V. A. Raschety i konstruirovaniye rezinovykh tekhnicheskikh izdeliy i form [Calculations and design of rubber technical products and forms]. Leningrad: Khimiya Publ.; 1971. 312 p. (In Russ.).
8. Fedukin L. D., ed. Primeneniye rezinovykh tekhnicheskikh izdeliy v narodnom khozyaystve: sprav. posobie [The use of rubber technical products in the national economy: handbook]. Moscow: Khimiya Publ.; 1986. 240 p. (In Russ.).
9. Lavendel E. E., ed. Vibratsii v tekhnike: sprav. T. 4. Vibratsionnye protsessy i mashiny [Vibrations in technology: handbook. Vol. 4. Vibration processes and machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1981. 509 p. (In Russ.).
10. Issledovaniya po sozdaniyu podveski tyagovogo elektrodvigatelya so sfericheskimi rezinometallicheskimi sharnirami dlya teplovozo s oporno-osevym privodom. Zaklyuchitel'nyy otchet: VNITI I-17-85 [Research on the creation of a traction motor suspension with spherical rubber-metal joints for diesel locomotives with a support-axial drive. Final report: VNITI I-17-85]. Kolomna; 1985. 55 p. (In Russ.).
11. Rezul'taty stendovykh ispytaniy podvesok reduktora tyagovogo privoda teplovoza 2TE121. Zaklyuchitel'nyy otchet: VNITI I-101-87 [The results of bench tests of the suspensions of the traction drive gear of the diesel locomotive 2TE121. Final report: VNITI I-101-87]. Kolomna; 1987. 68 p. (In Russ.).
12. Kossov V. S., Kokorev A. I., Lysak V. A., et al. Sposob sborki rezinometallicheskogo sfericheskogo sharnira [Method for assembling a rubber-metal spherical hinge]. Authorship certificate No. 1493807 SSSR, MPK F16C 11/06: No. 4272700/25-27: appl. 04.05.87: publ. 15.07.89. 5 p. (In Russ.).
13. Penkin N. S., Kopchenkov V. G., Serbin V. M., et al. Gummirovaniye detali mashin [Gummed machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2013. 245 p. (In Russ.).
14. Sokolov Yu. N., Ponomarev A. S., Degtyarev V. E. Povysheniye nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskikh elektrovozo EP1M i EP10 [Improving the reliability of traction drive units for passenger electric locomotives EP1M and EP10]. Lokomotiv inform = Locomotive inform. 2010;(6):4-11. (In Russ.).
15. Akhmadeev S. B., Kornev A. M. Analiz povrezhdeniy mekhanicheskoy chasti elektrovozo novogo pokoleniya v ekspluatatsii (na primere 2ES6) [Analysis of damage to the mechanical part of new generation electric locomotives in operation (on the example of 2ES6)]. Tekhnologicheskoe obespecheniye remonta i povysheniye dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Technological support for repair and improvement of the dynamic qualities of railway rolling stock]. Procs. of III Int. conf. (Omsk, December 10–11, 2015). Omsk: OmGUPS Publ.; 2015. Part 1. P. 203–208. (In Russ.).
16. Lepetov V. A., Yurtsev L. N. Raschety i konstruirovaniye rezinovykh izdeliy [Calculations and design of rubber products]. 2nd ed. Leningrad: Khimiya Publ.; 1977. 408 p. (In Russ.).

REFERENCES

1. Poturaev V. N. Rezinovye i rezinometallicheskie detali mashin [Rubber and rubber-metal parts of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1966. 299 p. (In Russ.).
2. Kornev A. M., Lipunov D. V. Modernizatsiya sistemy podveshivaniya TED elektrovoza postoyannogo toka 2ES6 [Modernization of the traction motor suspension system for a 2ES6 DC electric locomotive]. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poezdov [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction]. Procs. of III Int. conf. (Omsk, November 10–11, 2016). Omsk: OmGUPS Publ.; 2016. P. 237–242. (In Russ.).
3. Alekseeva M. S. Analiz raboty teplovozo serii 2TE25A "Vityaz" na Dal'nevostochnoy zheleznoy doroze [Analysis of the operation of

17. Vorob'ev V. I., Vorob'ev D. V., Izmerov O. V., et al. Sfericheskiy rezinometallicheskiy sharnir [Spherical rubber-metal joint]. Patent No. 202196 Russian Federation, MPK F16C 11/06 (2006.01): No. 2020121555: appl. 29.06.2020: publ. 05.02.2021. 8 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Сергеевич КОСМОДАМИАНСКИЙ,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), Author ID: 353032, <https://orcid.org/0000-0002-7835-3039>

Владимир Иванович ВОРОБЬЕВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Подвижной состав железных дорог», Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 1063042, <https://orcid.org/0000-0003-2897-1557>

Олег Васильевич ИЗМЕРОВ,

соискатель, кафедра «Подвижной состав железных дорог», Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 57193738041, <https://orcid.org/0000-0002-8450-6206>

Дмитрий Николаевич ШЕВЧЕНКО,

старший преподаватель, кафедра «Тяговый подвижной состав», Российский университет транспорта, (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), Author ID: 941016, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6424>

Дмитрий Юрьевич РАСИН,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Подвижной состав железных дорог», Брянский государственный технический университет, (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 513712, <https://orcid.org/0000-0002-5360-4401>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey S. KOSMODAMIANSKIY,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), Author ID: 353032, <https://orcid.org/0000-0002-7835-3039>

Vladimir I. VOROB'EV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Rolling Stock, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd.), Author ID: 1063042, <https://orcid.org/0000-0003-2897-1557>

Oleg V. IZMEROV,

Degree Applicant, Department of Railway Rolling Stock, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd.), Author ID: 57193738041, <https://orcid.org/0000-0002-8450-6206>

Dmitriy N. SHEVCHENKO,

Senior Lecturer, Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), Author ID: 941016, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6424>

Dmitriy Yu. RASIN,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Railway Rolling Stock, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd.), Author ID: 513712, <https://orcid.org/0000-0002-5360-4401>

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Сергеевич КОСМОДАМИАНСКИЙ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследования (15%).

Владимир Иванович ВОРОБЬЕВ. Оценка параметров сферического РМШ с точки зрения обеспечения надежности узлов экипажной части локомотива, патентование новой конструкции сферического РМШ по результатам исследований, редактирование текста статьи (15%).

Олег Васильевич ИЗМЕРОВ. Анализ известных методов расчетов резинометаллических изделий, экспериментальные исследования свойств сферического РМШ, анализ результатов моделирования (25%).

Дмитрий Николаевич ШЕВЧЕНКО. Проведение патентного поиска, исследование особенностей эксплуатации резинометаллических изделий на подвижном составе (15%).

Дмитрий Юрьевич РАСИН. Обоснование и структурирование методики расчета, разработка математической модели сферического РМШ, компьютерное моделирование (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey S. KOSMODAMIANSKIY. Formation of the research area, formulation of the goal and objectives, designation of the research algorithm (15%).

Vladimir I. VOROB'EV. Evaluation of the parameters of the spherical joint in regard to the reliability of the locomotive undercarriage units, patenting the new joint design based on the research results, editing the text of the article (15%).

Oleg V. IZMEROV. Analysis of known methods for calculating rubber-metal products, experimental research of the spherical joint features, analysis of simulation results (25%).

Dmitriy N. SHEVCHENKO. Carrying out a patent search, researching the operation of rubber-metal products on rolling stock (15%).

Dmitriy Yu. RASIN. Substantiation and structuring of the calculation method, development of the mathematical model of the spherical joint, computer simulation (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 16.02.2022, первая рецензия получена 10.03.2022, вторая рецензия получена 23.03.2022, принята к публикации 25.05.2022.

The article was submitted 16.02.2022, first review received 10.03.2022, second review received 23.03.2022, accepted for publication 25.05.2022.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.314

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133

EDN: <https://elibrary.ru/brymuc>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА****М. Ю. Пустоветов**Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ»,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Объектом исследования является вспомогательный частотно-регулируемый электропривод электроваза переменного тока, а более точно — структура и параметры системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности, входящего в состав электропривода в качестве узла, обеспечивающего электромагнитную совместимость электропривода с другим оборудованием на борту электроваза и сетью и его энергетическую эффективность. Цель исследования — обоснование структуры системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности, выбор типов регуляторов и расчет их параметров.

Материалы и методы. В качестве метода исследования выбран расчет передаточных функций регуляторов системы подчиненного регулирования с последующим компьютерным моделированием процессов в электрических цепях с использованием системы автоматизированного проектирования OrCAD.

Результаты. Сделан вывод о целесообразности использования двухконтурной системы подчиненного регулирования координат, содержащей контур регулирования напряжения и контур регулирования тока. Приведены и аналитически сопоставлены результаты моделирования двухконтурной системы регулирования координат активного корректора коэффициента мощности при различных типах регуляторов. Лучшие результаты показало моделирование при использовании аperiodического регулятора тока и пропорционально-интегрального регулятора напряжения.

Обсуждение и заключение. Полученные данные служат основой для дальнейшего улучшения работы активного корректора коэффициента мощности за счет совершенствования и оптимизации настроек, структуры и алгоритмов системы управления, которые при выбранной элементной базе силовой части позволят ему с высокой степенью надежности выполнять свои функции во всем диапазоне возмущающих и управляющих воздействий на борту электроваза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: активный корректор коэффициента мощности, подчиненное регулирование координат, электроваз переменного тока, вспомогательный электропривод, контур регулирования тока, контур регулирования напряжения, энергосбережение, электромагнитная совместимость

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи.

Для цитирования: Пустоветов М. Ю. Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электроваза // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 125–133. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133>.

Original article

UDK 621.314

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133

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



SIMULATION OF A DOUBLE-CIRCUIT SUBORDINATED COORDINATE REGULATION SYSTEM OF THE ACTIVE POWER FACTOR CORRECTOR FOR THE ELECTRIC LOCOMOTIVE AUXILIARY ELECTRIC DRIVE

Mikhail Yu. Pustovetov

Shipbuilding and ship repair yard RIF,
Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The object of this study is an auxiliary frequency-controlled electric drive of an AC locomotive, or more specifically, the structure and parameters of the system for regulating the coordinates of the active power factor corrector, which is a part of the electric drive and a unit that ensures the energy efficiency of the electric drive as well as its electro-magnetic compatibility with other equipment on board the electric locomotive and the power network. The purpose of the study is to substantiate the structure of the system for regulating the coordinates of an active power factor corrector, the choice of types of regulators and the calculation of their parameters.

Materials and methods. The author has chosen as the research method the calculation of transfer functions of regulators of the subordinated regulation system, followed by computer simulation of the processes in electrical circuits using the OrCAD computer-aided design system.

Results. The author made a conclusion about the expediency of using a two-circuit system of subordinated coordinate regulation containing a voltage control circuit and a current control circuit. The researcher presented and analytically compares the results of modelling of a two-circuit coordinate regulation system for the active power factor corrector for various types of regulators. The models with an aperiodic current regulator and a proportional-integral voltage regulator showed the best results.

Discussion and conclusion. The obtained data serve as the basis for further improvement of the active power factor corrector operation by improving and optimising the settings, structure and algorithms of the control system, which, with the selected hardware components of the power unit, will enable it to perform its functions with a high degree of reliability in the entire range of disturbing and controlling actions on board of an electric locomotive.

KEYWORDS: active power factor correction, substantiated coordinate regulation, AC locomotive, auxiliary electric drive, current control circuit, voltage control circuit, energy saving, electromagnetic compatibility

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

For citation: Pustovetov M. Yu. Simulation of a double-circuit subordinated coordinate regulation system of the active power factor corrector for the electric locomotive auxiliary electric drive. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):125-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-125-133>.

Введение. Схемы и принцип действия активного корректора коэффициента мощности (АККМ) даны в [1, 2, 3, 4, 5]. АККМ является одним из важных элементов блока питания вспомогательных цепей перспективных электропоездов, так как способствует энергосбережению за счет уменьшения потребления реактивной мощности и мощности искажений [1]. Примером отечественной разработки является использование АККМ на базе импульсного преобразователя постоянного напряжения повышающего типа [1] в составе преобразователя собственных нужд ПСН-169 на борту электропоезда переменного тока типа ЭП200 [6]. Альтернативным техническим решением с аналогичными функциями является использование в составе вспомогательного электропривода четырехквadrантного преобразователя [7, 8]. На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема и функциональная схема системы регулирования координат АККМ электропоезда.

Постановка задачи. Основные цели регулирования АККМ:

- 1) стабилизация выходного постоянного напряжения u_d на нагрузке;
- 2) стабилизация постоянного тока нагрузки i_d ;
- 3) формирование синусоидальной формы потребляемого (сетевого) тока i_c ;
- 4) обеспечение заданного фазового сдвига (как правило, требуется отсутствие сдвига фаз) сетевого тока i_c относительно сетевого напряжения u_c .

Цели регулирования 3 и 4 непосредственно служат коррекции (приближению к единице) коэффициента мощности электротехнической установки. Не пересказывая его дословно, можно отметить, что в общем случае подразумевается синусоидальное напряжение u_c и несинусоидальный ток i_c , потребляемый установкой. Коэффициент мощности будет тем ближе к единице, во-первых, чем меньше фазовый сдвиг первой гармоники тока от напряжения сети, во-вторых, чем менее искажена форма тока i_c (чем ближе она к синусоиде).

Цели регулирования 2 и 3 могут быть объединены в одну, которая формулируется следующим образом: формирование тока заданной величины (амплитуды) через входную индуктивность АККМ L_1 , имеющего форму выпрямленной синусоиды во времени.

Полагая, что сетевое напряжение АККМ $u_c = U_{cm} \sin(\omega t)$, в случае синфазности сетевых напряжения и тока для описания тока через входную индуктивность АККМ L_1 воспользуемся выражением из [1]:

$$i_{L_1} = \frac{U_{cm}}{R_e} |\sin(\omega t)|, \quad (1)$$

где R_e — эквивалентное входное сопротивление АККМ.

Ток i_{L_1} является переменной, зависимой от u_d , так как i_d , представляя составляющую i_{L_1} , является пере-

менной, зависимой от u_d . Напряжение u_d формируется в результате импульсного регулирования постоянного напряжения транзисторным преобразователем, а именно в результате коммутаций транзисторного ключа VT1. Данная логическая цепочка позволяет определить количество и иерархию контуров регулирования координат, а также объекты регулирования.

Метод решения задачи. Требуется два контура регулирования. Внутренним (подчиненным) контуром регулирования является контур регулирования тока i_{L_1} . Внешним будет контур регулирования напряжения u_d . Объектом регулирования в контуре регулирования тока является индуктивность L_1 — именно через нее требуется обеспечить протекание тока заданной формы и величины. Передаточной функцией (ПФ) объекта регулирования в контуре тока является $W_{o.p.i}(p) = 1/L_1 p$. ПФ объекта регулирования в контуре регулирования напряжения является последовательное соединение ПФ замкнутого контура регулирования тока i_{L_1} , обозначим как $W_{зам.i}(p)$, и ПФ транзисторного преобразователя $W_{ch}(p)$.

Определим тип (ПФ) регулятора в контуре регулирования тока $W_{p.i}(p)$. Желаемая ПФ разомкнутого контура регулирования тока имеет вид выражения (2) [9] или выражения (3):

$$W_{раз.жел.i}(p) = \frac{1}{a_i T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (2)$$

где T_μ — малая некомпенсируемая постоянная времени контура тока; $a_i = T_{0i}/T_\mu$ — соотношение постоянных времени; T_{0i} — постоянная времени оптимизированного контура регулирования тока.

$$W_{раз.жел.i}(p) = k_{si} W_{o.p.i}(p) W_{p.i}(p) = k_{si} \frac{1}{L_1 p} W_{p.i}(p), \quad (3)$$

где k_{si} — ПФ датчика тока i_{L_1} .

$$k_{si} = \frac{U_{y.max}}{I_{L_1 max}}, \quad (4)$$

где $I_{L_1 max}$ — наибольшее значение тока через входную индуктивность АККМ L_1 .

Из (3) выразим ПФ регулятора тока:

$$\begin{aligned} W_{p.i}(p) &= \frac{W_{раз.жел.i}(p)}{k_{si} W_{o.p.i}(p)} = \frac{\frac{1}{a_i T_\mu p (T_\mu p + 1)}}{k_{si} \frac{1}{L_1 p}} = \\ &= \frac{L_1}{k_{si} a_i T_\mu} \left(\frac{1}{T_\mu p + 1} \right) = k_{p.i} \left(\frac{1}{T_{p.i} p + 1} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_{p.i} = L_1/k_{si} a_i T_\mu$ — коэффициент усиления регулятора тока; $T_{p.i} = T_\mu$ — постоянная времени регулятора тока.

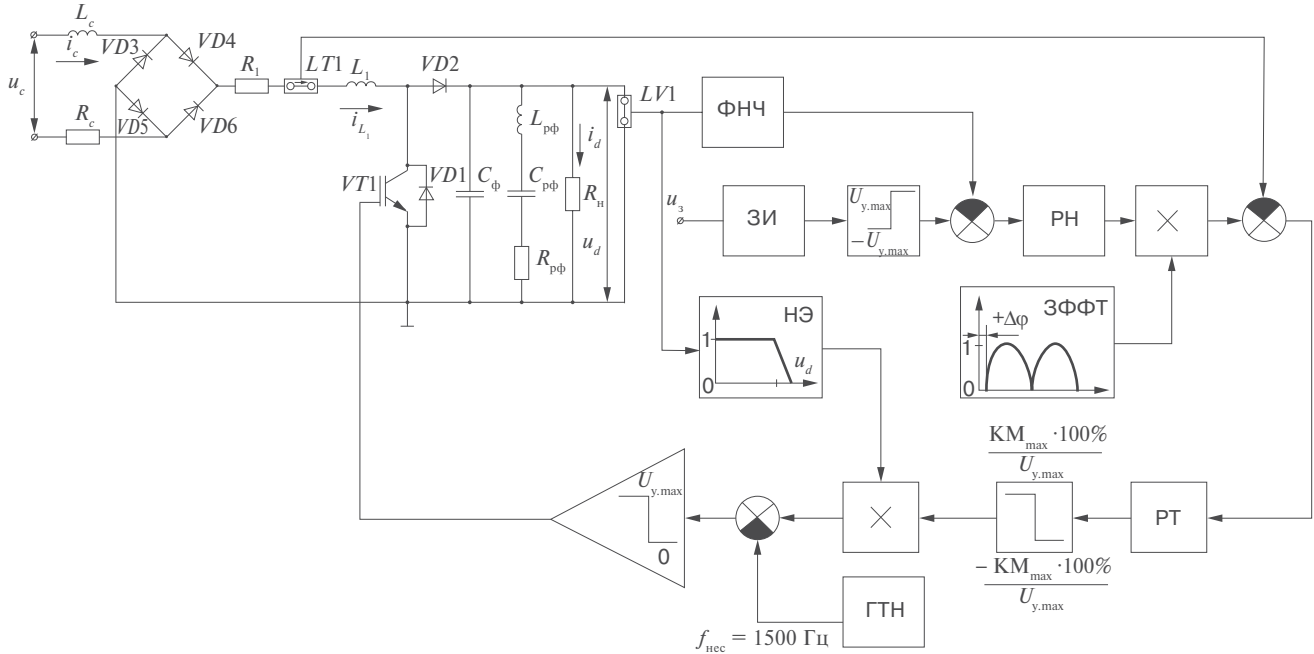


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема и функциональная схема системы регулирования координат АККМ электровоза: ФНЧ — фильтр нижних частот; ЗИ — задатчик интенсивности; РН — регулятор напряжения; ПТ — регулятор тока; ГТН — генератор треугольного напряжения; НЭ — нелинейный элемент; 3ФФТ — задатчик формы (синусоида) и фазы сетевого тока (в реальном АККМ (не в математической модели, где априори известна фаза сетевого напряжения u_c) требуется синхронизация работы 3ФФТ с частотой и фазой сетевого напряжения); LT1 — датчик тока; LV1 — датчик напряжения; $U_{y,max}$ — наибольшее значение напряжения системы управления; $f_{нec} = 1500$ Гц — несущая частота широтно-импульсного регулирования напряжения; KM_{max} — наибольшее значение коэффициента модуляции; $L_{рф}$, $C_{рф}$, $R_{рф}$ — элементы резонансного фильтра, настроенного на частоту 100 Гц; u_3 — задающее напряжение системы управления; $\Delta\phi$ — задаваемый фазовый сдвиг сетевого тока i_c относительно сетевого напряжения

Fig. 1. Electrical circuit diagram and functional diagram of the coordinate regulation system of the active power factor corrector of an electric locomotive:

ФНЧ — low-pass filter; ЗИ — intensity generator; РН — voltage regulator; ПТ — current regulator; ГТН — triangular voltage generator; НЭ — non-linear element; 3ФФТ — generator of shape (sinusoid) and phase of the mains current (in a real power factor corrector (not in a mathematical model, where the phase of the mains voltage u_c is known a priori), synchronisation of the operation of the generator with the frequency and phase of the mains voltage is required); LT1 — current sensor; LV1 — voltage sensor; $U_{y,max}$ — the highest voltage value of the control system; $f_{нec} = 1500$ Hz — carrier frequency of pulse-width voltage regulation; KM_{max} — the highest value of the modulation coefficient; $L_{рф}$, $C_{рф}$, $R_{рф}$ — elements of a resonant filter tuned to a frequency of 100 Hz; u_3 — setting voltage of the control system; $\Delta\phi$ — the specified phase shift of the mains current i_c relative to the mains voltage; i_d , u_d — constant load current and constant voltage on the load; i_{L1} — current control circuit

По виду результирующего выражения (5) можно сделать вывод, что получена ПФ аperiodического регулятора (А-регулятора), который может быть представлен как операционный усилитель (ОУ), охваченный обратной связью, содержащей параллельно соединенные R и C [10]. Стандартный подход к определению ПФ активных корректирующих звеньев на базе ОУ, изложенный в частности в [11], гласит, что ПФ активного корректирующего звена в случае неинвертирующего ОУ будет иметь вид

$$W_a(p) = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}, \quad (6)$$

где Z_1 — сопротивление на входе корректирующего звена в продольной ветви; Z_2 — сопротивление обратной связи, охватывающей ОУ.

Применительно к А-регулятору получим в соответствии с обозначениями, принятыми в [10]: $Z_1 = R_1$;

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_{oc}} + \frac{1}{1/pC_{oc}}, \text{ откуда } Z_2 = \frac{R_{oc}}{pC_{oc}R_{oc} + 1}.$$

ПФ А-регулятора получится в виде

$$W_{PA}(p) = \frac{R_{oc}}{R_1} \left(\frac{1}{C_{oc}R_{oc}p + 1} \right) = k_A \left(\frac{1}{T_A p + 1} \right). \quad (7)$$

Определим тип регулятора в контуре регулирования напряжения $W_{p.u}(p)$. Желаемая ПФ разомкнутого контура регулирования напряжения имеет вид выражения (8) [9] или (9):

$$W_{раз.жел.н}(p) = \frac{1}{a_u a_i T_{\mu} p (a_i T_{\mu} p + 1)}, \quad (8)$$

где $a_u = T_{0u}/T_{0i}$ — соотношение постоянных времени; T_{0u} — постоянная времени оптимизированного контура регулирования напряжения.

С другой стороны,

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = k_{su} W_{\text{зам.}i}(p) W_{ch}(p) W_{p.u}(p), \quad (9)$$

где k_{su} — ПФ датчика напряжения u_d .

$$W_{\text{зам.}i}(p) = \frac{1}{a_i T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1} \frac{1}{k_{si}} \approx \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1}; \quad (10)$$

$$W_{ch}(p) = \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1}, \quad (11)$$

где k_{ch} — коэффициент передачи транзисторного преобразователя; T_{ch} — постоянная времени для транзисторных преобразователей.

Согласно [12] T_{ch} определяется по формуле

$$T_{ch} = \frac{1}{f_k}, \quad (12)$$

где f_k — частота коммутации транзисторного ключа VT1.

Коэффициент передачи транзисторного преобразователя рассчитывается по формуле

$$k_{ch} = \frac{U_{d \text{ ном}}}{U_{y. \text{ max}}}, \quad (13)$$

где $U_{d \text{ ном}}$ — номинальное значение постоянного напряжения на нагрузке; $U_{y. \text{ max}}$ — наибольшее значение напряжения системы управления.

$$k_{su} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{U_{d \text{ ном}}}. \quad (14)$$

Перепишем (9) с учетом (10) и (11):

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1} \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1} W_{p.u}(p). \quad (15)$$

Из (9) с учетом (15) выразим ПФ регулятора напряжения:

$$\begin{aligned} W_{p.u}(p) &= \frac{W_{\text{раз.жел.}u}(p)}{k_{su} W_{\text{зам.}i}(p) W_{ch}(p)} = \frac{1}{\frac{a_u a_i T_{\mu} p (a_i T_{\mu} p + 1)}{k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_{\mu} p + 1} \frac{k_{ch}}{T_{ch} p + 1}}} = \\ &= \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \left(\frac{T_{ch}}{T_{\mu}} + \frac{1}{T_{\mu} p} \right) = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}} \left(1 + \frac{1}{T_{ch} p} \right) = \\ &= k_{p.u} \left(1 + \frac{1}{T_{p.u}} \right), \end{aligned} \quad (16)$$

где $k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}}$ — коэффициент усиления регулятора напряжения; $T_{p.u} = T_{ch}$ — постоянная времени регулятора напряжения.

Из выражения (16) следует, что получена ПФ пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора). Настройка контуров регулирования сводится, таким образом, к выбору величин T_{μ} , a_i , a_u , а также $I_{L1 \text{ max}}$.

Учтем, что дополнительными целями регулирования АККМ являются:

1) ограничение коэффициента заполнения напряжения (коэффициента модуляции) при широтно-импульсном регулировании транзисторного ключа VT1 (например, $KM_{\text{max}} = 0,85$);

2) ограничение максимального мгновенного напряжения $U_{d \text{ max}}$ (например, $U_{d \text{ max}} = 700$ В) — для этого предусматривается дополнительно канал прямого ограничения величины выходного напряжения (см. НЭ на рис. 1). Действие этого канала основано на том, что при достижении $U_{d \text{ max}} = 700$ В сигнал об этом, минуя регуляторы, блокирует отпирание транзисторного ключа до снижения выходного напряжения;

3) возможность сохранения формы сетевого тока близкой к синусоидальной при изменении нагрузки на выходе АККМ.

Анализ полученных результатов. Компьютерное моделирование в OrCAD показало, что вариантом настроек, позволяющим получить приемлемое качество регулирования, является следующее сочетание параметров:

$$a_i = a_u = 4; T_{\mu} = 0,1 T_{ch}; I_{L1 \text{ max}} = 650 \text{ А.}$$

При этом другие параметры схемы регулирования координат АККМ имеют следующие значения:

$$L_1 = 0,78 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; k_{ch} = \frac{U_{d \text{ ном}}}{U_{y. \text{ max}}} = \frac{660}{10} = 66 \text{ В/В};$$

$$k_{si} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{I_{L1 \text{ max}}} = \frac{10}{650} = 0,0153 \text{ В/А};$$

$$k_{su} = \frac{U_{y. \text{ max}}}{U_{d \text{ ном}}} = \frac{10}{660} = 0,0152 \text{ В/В};$$

$$T_{p.i} = T_{\mu} = 0,1 T_{ch} = 0,1 \cdot 0,00067 \approx 0,00007 \text{ с};$$

$$k_{p.i} = \frac{L_1}{k_{si} a_i T_{\mu}} = \frac{0,78 \cdot 10^{-3}}{0,0153 \cdot 4 \cdot 0,00007} = 182,1;$$

$$T_{p.u} = T_{ch} = \frac{1}{f_k} = \frac{1}{1500} = 0,00067 \text{ с};$$

$$k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u a_i k_{ch} k_{su}} \frac{T_{ch}}{T_{\mu}} = \frac{0,0153}{4 \cdot 4 \cdot 66 \cdot 0,0152} \cdot \frac{0,00067}{0,00007} = 0,0092.$$

Такие настройки предпочтительны, если сопротивление нагрузки R_n может меняться в широких пределах. Результаты моделирования при $R_{n \text{ ном}} = 3,94$ Ом (соответствует мощности преобразователя около 110 кВт) показаны на рис. 2, 3.

Результаты моделирования при $R_n = 5 \cdot 3,94 = 19,7 \text{ Ом}$ даны на рис. 4.

В качестве альтернативы вышеописанной структуре системы подчиненного регулирования координат АКМ может быть предложена аналогичная структура, где вместо А-регулятора тока используется П-регулятор (пропорциональный). При этом в качестве предпосылок к синтезу системы принимаются:

$$W_{\text{раз.жел.}i}(p) = \frac{1}{a_i T_\mu p}; \quad (17)$$

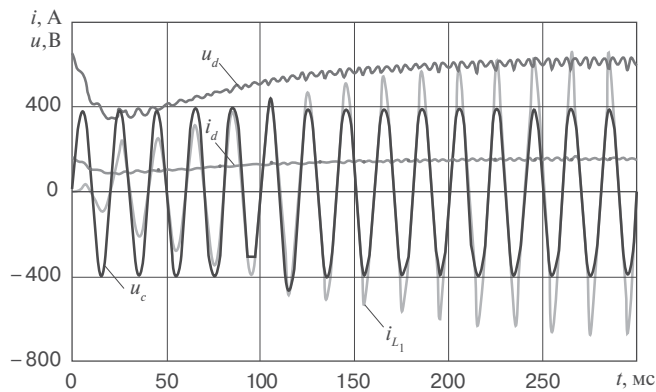


Рис. 2. Результаты моделирования АКМ при $R_{n \text{ ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 4$ (переходный процесс включения АКМ при предварительно заряженных до номинального $u_d = 660 \text{ В}$ конденсаторах C_ϕ и $C_{\text{рф}}$) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 2. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n \text{ ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 4$ (transient process of turning on the corrector with capacitors C_ϕ and $C_{\text{рф}}$ pre-charged to nominal $u_d = 660 \text{ V}$) when using an aperiodic current regulator (A-regulator) and proportionally integral voltage regulator (PI-regulator)

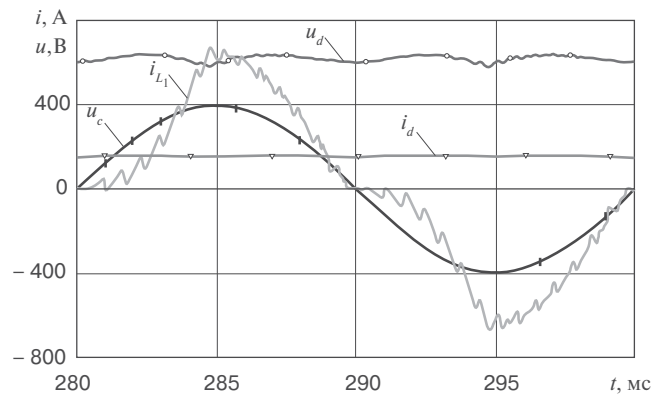


Рис. 3. Результаты моделирования АКМ при $R_{n \text{ ном}} = 3,94 \text{ Ом}$ (установившийся режим) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 3. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n \text{ ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$ (steady state) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

$$W_{\text{раз.жел.}u}(p) = \frac{1}{a_u a_i T_\mu p}; \quad (18)$$

$$W_{ch}(p) = k_{ch}. \quad (19)$$

В результате преобразований получим ПФ регулятора тока в виде

$$W_{p.i}(p) = \frac{W_{\text{раз.жел.}i}(p)}{k_{si} W_{o.p.i}(p)} = \frac{\frac{1}{a_i T_\mu p}}{k_{si} \frac{1}{L_1 p}} = \frac{L_1}{k_{si} a_i T_\mu} = k_{p.i}, \quad (20)$$

а ПФ регулятора напряжения в виде

$$W_{p.u}(p) = \frac{W_{\text{раз.жел.}u}(p)}{k_{su} W_{зам.i}(p) W_{sh}(p)} = \frac{\frac{1}{a_u a_i T_\mu p}}{k_{su} \frac{1/k_{si}}{a_i T_\mu p + 1} k_{ch}} = \frac{k_{si}}{a_u k_{ch} k_{su}} \left(1 + \frac{1}{a_i T_\mu p} \right) = k_{p.u} \left(1 + \frac{1}{T_{p.u} p} \right), \quad (21)$$

где $k_{p.u} = \frac{k_{si}}{a_u k_{ch} k_{su}}$; $T_{p.u} = a_i T_\mu$.

Моделирование альтернативной структуры системы регулирования координат АКМ показало, что при номинальной нагрузке она дает сходные с предыдущей схемой результаты (рис. 5, 6), но в режимах, близких к холостому ходу (рис. 7), по сравнению с рис. 4 значительно ухудшается форма сетевого тока, увеличивается его амплитуда, хуже стабилизация напряжения u_d . Сравнительные количественные характеристики АКМ при разных структурах регулирования, полученные при анализе результатов компьютерного моделирования, представлены в таблице, где базисной величиной для расчета размаха колебаний u_d (рис. 3, 4, 6, 7) и его низшего значения в переходном процессе (рис. 2, 5) выбраны 660 В.

На рис. 8 показаны результаты моделирования, аналогичные результатам на рис. 2, но предпринята успешная попытка увеличить быстродействие системы автоматического регулирования АКМ: длительность переходного процесса сократилась в 10 раз. Для этого в настройках задано $a_i = a_u = 1$.

Возможным компромиссом между повышением быстродействия системы регулирования и сохранением в установившемся режиме близкой к синусоиде формы сетевого тока при режимах, близких к холостому ходу, является использование настроек $a_i = 4$, $a_u = 3$.

Если при прочих равных условиях принять вместо рассмотренного выше соотношения $T_\mu = 0,1 T_{ch}$ соотношение $T_\mu = T_{ch}$, это приведет к замедлению быстродействия системы, приближению формы сетевого тока к треугольной, увеличению амплитуды сетевого тока на 25 %.

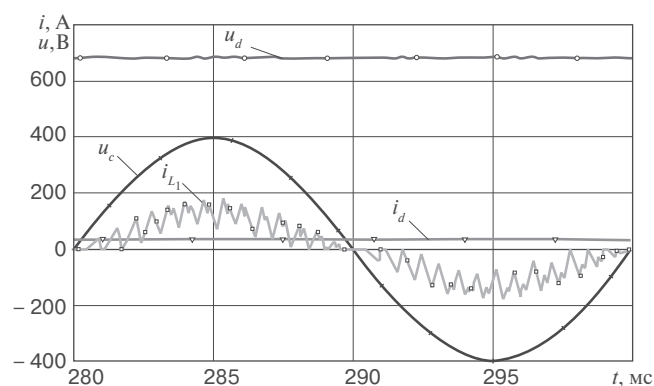


Рис. 4. Результаты моделирования АККМ при $R_n = 19,7$ Ом (установившийся режим) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 4. Results of the active power factor corrector simulation at $R_n = 19.7$ Ohm (steady state) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

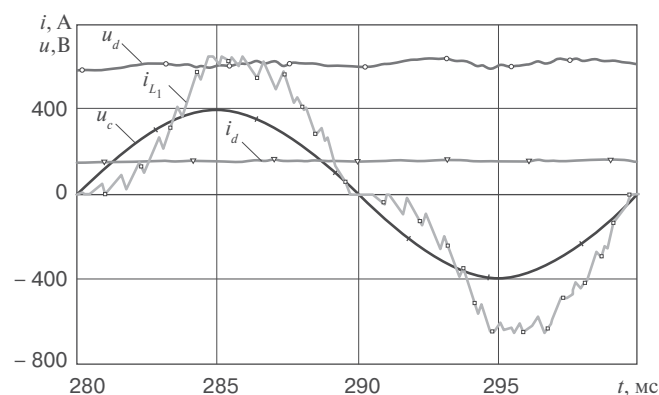


Рис. 6. Результаты моделирования АККМ при $R_{n\text{ HOM}} = 3,94$ Ом (установившийся режим) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 6. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n\text{ HOM}} = 3.94$ Ohm (steady state) by using a P-regulator of current and PI-regulator of voltage

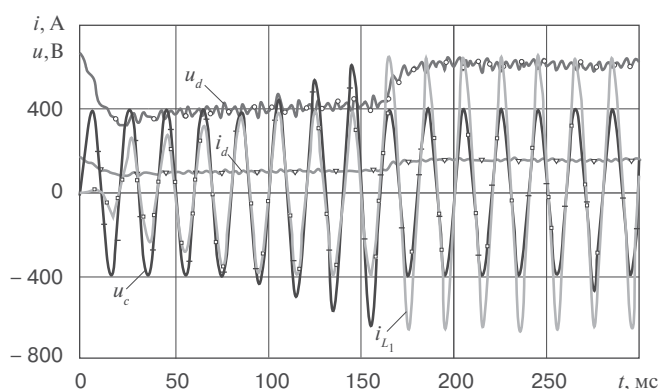


Рис. 5. Результаты моделирования АККМ при $R_{n\text{ HOM}} = 3,94$ Ом, $a_i = a_u = 4$ (аналогично рис. 2) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 5. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{n\text{ HOM}} = 3.94$ Ohm, $a_i = a_u = 4$ (similar to fig. 2) by using a P-regulator (proportional regulator) of current and a PI-regulator of voltage

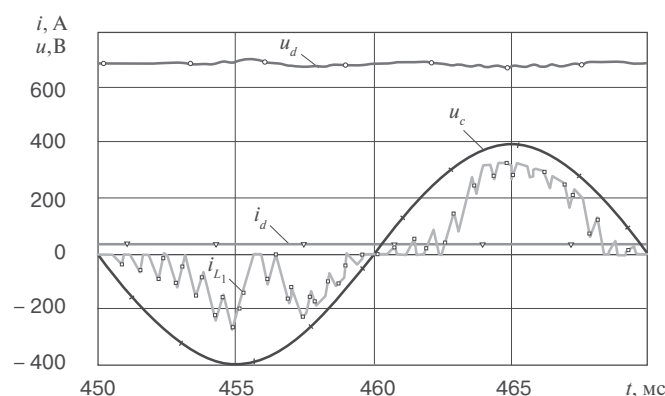


Рис. 7. Результаты моделирования АККМ при $R_n = 19,7$ Ом (установившийся режим) при использовании П-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 7. Results of the active power factor corrector simulation at $R_n = 19.7$ Ohm (steady state) by using a P-regulator of current and PI-regulator of voltage

Таблица

Сравнительные характеристики АККМ при разных структурах системы регулирования, полученные в результате компьютерного моделирования (рис. 2–7)

Table

Comparative characteristics of the active power factor correctors with different structures of the regulation system obtained as a result of computer simulation (fig. 2–7)

Наименование характеристики, единицы измерения	Составляющие системы регулирования координат АККМ	
	А-регулятор тока, ПИ-регулятор напряжения (рис. 2–4)	П-регулятор тока, ПИ-регулятор напряжения (рис. 5–7)
Переходный режим		
Длительность переходного процесса, мс	240	180
Низшее значение u_d в переходном процессе, %	51,5	47,5
Установившийся режим		
Размах колебаний u_d при номинальной нагрузке, %	9,5	12,5
Размах колебаний u_d при холостом ходе, %	2,2	5,9
Максимальное значение i_c при номинальной нагрузке, А	672,5	647,1
Максимальное значение i_c при холостом ходе, А	176,4	335,3

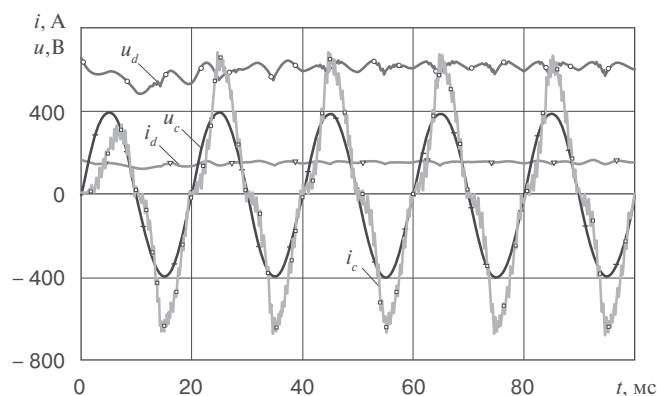


Рис. 8. Результаты моделирования АККМ при $R_{н\text{ ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 1$ (переходный процесс включения АККМ при предварительно заряженных до номинального $u_d = 660 \text{ В}$ конденсаторах C_Φ и $C_{рф}$) при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 8. Results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 1$ (transient process of turning on the corrector with capacitors C_Φ and $C_{рф}$ pre-charged to nominal $u_d = 660 \text{ V}$) by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

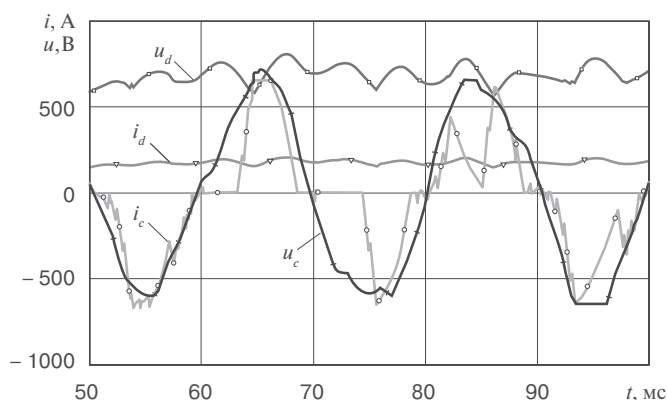


Рис. 9. Фрагмент результатов моделирования АККМ при $R_{н\text{ ном}} = 3,94 \text{ Ом}$, $a_i = a_u = 1$ в условиях полигармонического напряжения сети, действующее значение первой гармоники которого изменяется от 270 до 470 В за 20 мс, при использовании А-регулятора тока и ПИ-регулятора напряжения

Fig. 9. A fragment of the results of the active power factor corrector simulation at $R_{н\text{ ном}} = 3.94 \text{ Ohm}$, $a_i = a_u = 1$ under conditions of a polyharmonic mains voltage, the effective value of the first harmonic of which changes from 270 to 470 V in 20 ms, by using an A-regulator of current and PI-regulator of voltage

Как уже говорилось ранее, обычно подразумевается, что u_c синусоидальное. На самом деле его форма зачастую далека от идеальной ввиду влияния нелинейных нагрузок. В частности, при использовании электровазов с тяговыми выпрямительно-инверторными установками с зонно-фазовым регулированием значительная несинусоидальность u_c обусловлена процессами коммутации в тяговом преобразователе. Пример такого искаженного напряже-

ния на обмотке собственных нужд тягового трансформатора 2ЭС5К «Ермак» приведен в [13, 14].

Для прояснения влияния несинусоидальности и колебаний величины u_c на функционирование АККМ проведено компьютерное моделирование, когда u_c представлено полигармоническим сигналом. Дополнительно к этому действующее значение первой гармоники напряжения сети изменяется за 20 мс (от момента времени 50 мс) от 270 до 470 В. Результаты моделирования показаны на рис. 9. Видно, что несинусоидальность u_c сама по себе не ухудшает существенно форму i_c (первый полупериод на рис. 9). В большей мере форма i_c ухудшается и становится прерывистой при повышении u_c , когда для стабилизации u_d приходится допускать длительные паузы между проводящими состояниями транзистора VT1 при превышении $U_{d\text{ max}} = 700 \text{ В}$, что снижает коэффициент мощности.

Обсуждение и заключение. На основании анализа результатов компьютерного моделирования следует признать пригодной для АККМ в составе вспомогательного электропривода электровазов двухконтурную систему подчиненного регулирования координат, содержащую апериодический регулятор тока и пропорционально-интегральный регулятор напряжения, поскольку такая структура обеспечивает меньшую динамическую просадку напряжения при подключении нагрузки, меньший размах колебаний напряжения на нагрузке, меньшую амплитуду тока при холостом ходе и лучшую его синусоидальность. Выбор настроек системы регулирования требует дополнительных исследований с точки зрения достижения наилучшего результата с учетом быстродействия системы, приближения формы сетевого тока к синусоидальной в широком диапазоне величины нагрузки, колебаний величины напряжения сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 200 с.
2. Мелешин В.И., Нечагин М.А. Проектирование однофазных выпрямителей с активной коррекцией коэффициента мощности // Электротехника. 1998. № 3. С. 42–48.
3. Дмитриков В.Ф., Сергеев В.В., Самылин И.Н. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств. М.: Радио и связь, 2005. 424 с.
4. Powniker S., Shelar S. Development of Active Power Factor Correction controller using boost converter // 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, 19–21 December 2016. [S. l.], 2016. P. 8009120. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2016.8009120>.
5. Nazarkar S., Shelar S. Design & Simulation of Active Power Factor Controller Using Boost Converter // Novateur Publications International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT). 2016. Vol. 3. P. 1–8.
6. Хоменко Б.И., Колпахчан Г.И., Пехотский И.В. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС // Электровазостроение. 2003. Т. 45. С. 184–191.

7. Энергосбережение в системах питания вспомогательных машин электроваз переменного тока серии «Ермак» за счет внедрения ШПВМ-250-У2 / А.А. Тишкин [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения (Вестник ВЭЛНИИ). 2012. Т. 1, № 63. С. 63–74.
8. Тишкин А.А. Схемотехнические решения приводов вспомогательных машин электровазов переменного тока // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Саранск, 2014. Т. 2. С. 425–427.
9. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
10. Кисаримов Р.А. Электропривод: справ. М.: РадиоСофт, 2008. 352 с.
11. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2001. 304 с.
12. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учеб. для вузов. М.: Изд-во РАСХН, 2003. 320 с.
13. Pustovetov M. Yu., Pustovetov K. M. The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 3–4 October 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8602672. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602672>.
14. Пустоветов М.Ю. Пульсации электромагнитного момента трехфазной асинхронной электрической машины, работающей в составе вспомогательного электропривода электроваз переменного тока — фактор, способствующий отказам подшипников // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 331–337.

REFERENCES

1. Popkov O. Z. Osnovy preobrazovatel'noy tekhniki: ucheb. posobie dlya vuzov [Fundamentals of converting technology: textbook]. Moscow: MEI Publ.; 2005. 200 p. (In Russ.).
2. Meleshin V. I., Nechagin M. A. Proektirovanie odnofaznykh vypryamiteley s aktivnoy korrektsiyei koeffitsienta moshchnosti [Design of single-phase rectifiers with active power factor correction]. *Elektrotekhnika = Russian Electrical Engineering*. 1998;(3):42-48. (In Russ.).
3. Dmitriyev V. F., Sergeev V. V., Samylin I. N. Povyshenie effektivnosti preobrazovatel'nykh i radiotekhnicheskikh ustroystv [Improving the efficiency of converters and radio devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ.; 2005. 424 p. (In Russ.).
4. Powniker S., Shelar S. Development of Active Power Factor Correction controller using boost converter. 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Pune, India, December 19–21, 2016. [S. l.]; 2016. P. 8009120. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2016.8009120>.
5. Nazarkar S., Shelar S. Design & Simulation of Active Power Factor Controller Using Boost Converter. *Novateur Publications International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2016;(3):1-8.
6. Khomenko B. I., Kolpakch'yan G. I., Pekhotskiy I. V. Vspomogatel'nye tranzistornye preobrazovateli dlya perspektivnogo EPS [Auxiliary transistor converters for advanced electric rolling stock]. *Elektrovozostroyeniye = Electric locomotive engineering*. 2003;(45):184-191. (In Russ.).
7. Tishkin A. A., Kurganov A. A., Kalyuzhnyy A. A., Sinyavskiy I. V. Energoberezhniye v sistemakh pitaniya vspomogatel'nykh mashin elektrovoza peremennogo toka serii "Ermak" za schet vnedreniya ShPVM-250-U2 [Energy saving in the power supply systems of auxiliary machines of the Ermak series AC electric locomotive due to the introduction of ShPVM-250-U2]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroyeniya (Vestnik VEINII) = Journal of the All-Russian Research and Development Institute of Electric Locomotives*. 2012;1(63):63-74. (In Russ.).

8. Tishkin A. A. Skhemotekhnicheskie resheniya privodov vspomogatel'nykh mashin elektrovoza peremennogo toka [Circuit solutions for drives of auxiliary machines of AC electric locomotives]. *Trudy VIII Mezhdunar. (XIX Vseros.) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of the VIII Int. (XIX All-Russian) conf. on automated electric drive AEP-2014]. Saransk: [S. l.]; 2014. Vol. 2. P. 425–427. (In Russ.).
9. Klyuchev V. I. Teoriya elektroprivoda: ucheb. dlya vuzov [Theory of electric drive: textbook]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2001. 704 p. (In Russ.).
10. Kisarimov R. A. Elektroprivod: sprav. [Electric drive: handbook]. Moscow: RadioSoft Publ.; 2008. 352 p. (In Russ.).
11. Erofeev A. A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control]. 2nd ed. St. Petersburg: Politehnika Publ.; 2001. 304 p. (In Russ.).
12. Onishchenko G. B. Elektricheskiy privod: ucheb. dlya vuzov [Electric drive: textbook]. Moscow: RASKhN Publ.; 2003. 320 p. (In Russ.).
13. Pustovetov M. Yu., Pustovetov K. M. The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, October 3–4, 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 8602672. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602672>.
14. Pustovetov M. Yu. Pul'satsii elektromagnitnogo momenta trekhfaznoy asinkhronnoy elektricheskoy mashiny, rabotayushchey v sostave vspomogatel'nogo elektroprivoda elektrovoza peremennogo toka — faktor, sposobstvuyushchiy otkazam podshipnikov [The Electromagnetic Torque Ripple of Three-Phase Induction Electric Machine, Operating as a Part of the Auxiliary Electric Drive Onboard of AC Electric Locomotive — a Factor Contributing to the Failure of Bearings]. *Mekhanika XXI veku = Mechanical engineers to XXI century*. 2016;(15):331-337. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михаил Юрьевич ПУСТОВЕТОВ, канд. техн. наук, доцент по кафедре «Автоматизация и электропривод станочных систем», инженер-конструктор по электрической части, Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ» (344019, г. Ростов-на-Дону, Россия, ул. 13-я линия, д. 93), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail Yu. PUSTOVETOV, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automation and Electric Drives of Machine Tool Systems, Electrical Design Engineer, Shipbuilding and ship repair yard RIF (344019, Russia, Rostov-on-Don, 93, 13th line St.), Author ID: 416793, <https://orcid.org/0000-0001-7900-4407>

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.*

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

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

Статья поступила в редакцию 05.03.2022, первая рецензия получена 25.03.2022, вторая рецензия получена 11.04.2022, принята к публикации 26.05.2022.
The article was submitted 05.03.2022, first review received 25.03.2022, second review received 11.04.2022, accepted for publication 26.05.2022.

Научная статья

УДК 629.4.027.35

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147

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



ПРИМЕНЕНИЕ УПРУГОЗАЩИЩЕННОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ В РЕССОРНОМ ПОДВЕШИВАНИИ ЛОКОМОТИВОВ

А. Н. Савоськин¹, Н. С. Лавлинская¹✉, П. Ю. Иванов²

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

²Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
Иркутск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В экипажной части современных локомотивов для демпфирования вертикальных колебаний, возникающих в буксовой ступени рессорного подвешивания, широко применяют гидравлические гасители колебаний, сила сопротивления которых прямо пропорциональна скорости деформации рессорного комплекта. Высокий уровень частот и амплитуд колебаний в буксовой ступени приводит к значительному увеличению скорости деформации и диссипативных сил, что вызывает частые отказы гидравлических гасителей колебаний. Поэтому вопросы, связанные с повышением работоспособности буксовых гидравлических гасителей, являются актуальными.

Материалы и методы. Для оценки эффективности применения в буксовом подвешивании упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний проведено исследование колебаний упрощенной модели электровоза 2ЭС5К с типовой схемой буксовой ступени рессорного подвешивания и схемой с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний. В качестве кинематического возмущения колебаний использовался высокочастотный случайный процесс. Решение системы дифференциальных уравнений было выполнено в программном пакете MatLab — Simulink численным интегрированием с помощью метода Рунге — Кутты IV порядка. В результате решения были получены реализации стационарных и эргодических случайных процессов.

Результаты. Сравнение полученных характеристик случайных процессов колебаний этих двух вариантов показало, что применение упругозащищенного буксового гасителя колебаний существенно снижает частотный диапазон и амплитуды диссипативных сил, благодаря чему обеспечивается снижение количества отказов буксовых гасителей и увеличение межремонтных пробегов.

Обсуждение и заключение. Показанная эффективность применения схемы с упругозащищенным буксовым гасителем колебаний позволяет повысить надежность гасителя. Для определения межремонтного пробега следует провести подконтрольную эксплуатацию или испытания опытного образца буксового узла с упругозащищенным гасителем колебаний и уточнить значения параметров такого узла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: упругозащищенный гидравлический гаситель колебаний, диссипативные характеристики, рессорное подвешивание, подвижной состав, колебания упрощенной модели, вероятностные характеристики случайных процессов, динамические показатели рельсовых экипажей

Для цитирования: Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С., Иванов П. Ю. Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рессорном подвешивании локомотивов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 134–147. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147>.

Original article

UDK 629.4.027.35

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147

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



APPLICATION OF ELASTICALLY PROTECTED HYDRAULIC VIBRATION DAMPER IN SPRING SUSPENSION OF LOCOMOTIVES

Anatoliy N. Savos'kin¹, Nataliya S. Lavlinskaya¹✉, Pavel Yu. Ivanov²

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the undercarriage of modern locomotives hydraulic vibration dampers are widely used to dampen vertical vibrations that occur in the axlebox stage of the spring suspension. Their resistance force is directly proportional to the deformation rate of the spring set. High levels of vibration frequencies and amplitudes in the axlebox stage lead to a significant increase in the strain rate and dissipative forces, which causes frequent failures of hydraulic vibration dampers. Therefore, issues related to improving the performance of axlebox hydraulic dampers are actual.

Materials and methods. In order to evaluate the effectiveness of elastically protected hydraulic vibration damper in axlebox suspension, the authors studied the vibrations of a simplified model of a 2ES5K electric locomotive with a typical layout of the axlebox stage of spring suspension and a circuit with an elastically protected hydraulic vibration damper. The authors used a high-frequency random process as a kinematic perturbation of vibrations. The system of differential equations was solved in the MatLab — Simulink software package by numerical integration using the Runge — Kutta method of the fourth order. As a result of the solution, realisation of stationary and ergodic random processes were obtained.

Results. The comparison of the obtained characteristics of random processes of vibrations of these two options showed that the use of an elastically protected axlebox vibration damper significantly reduces the frequency range and amplitudes of dissipative forces, which ensures a reduction in the number of axlebox damper failures and an increase in the number of runs before replacement is required.

Discussion and conclusion. The shown efficiency of using an elastically protected axlebox vibration damper allows increasing the reliability of the damper. In order to determine the distance run between overhauls, it is necessary to carry out a controlled operation cycle or test the prototype axlebox assembly with the elastically protected vibration damper and measure the parameters of such assembly.

KEYWORDS: elastically protected hydraulic vibration damper, dissipative characteristics, spring suspension, rolling stock, vibrations of a simplified model, probabilistic characteristics of random processes, dynamic performance of rail vehicles

For citation: Savos'kin A. N., Lavlinskaya N. S., Ivanov P. Yu. Application of elastically protected hydraulic vibration damper in spring suspension of locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):134-147. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147>.

Введение. У современных электровазов серий ВЛ65, ЭП1, 2ЭС5К для демпфирования вертикальных колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания применены гидравлические гасители колебаний. Из-за высоких частот и амплитуд колебаний возникает высокий уровень динамических сил, действующих на гасители, что приводит к их частым отказам в эксплуатации. Так, например, по данным сервисного локомотивного депо г. Иркутска, количество таких отказов за 2020 и 2021 гг. составило 1051, причем 978 гасителей были гасителями вертикальных колебаний, а 73 — горизонтальных. Из 978 неисправных вертикальных гасителей 885 приходится на гасители буксовой ступени, т. е. ~90 %, и только 93 на вертикальные гасители центральной ступени, т. е. ~10 %. Таким образом, отказы вертикальных гасителей буксовой ступени происходят в 9 раз чаще, чем отказы вертикальных гасителей центральной ступени.

Известно два способа снижения уровня и частоты вибраций, действующих на вертикальные гасители буксовой ступени. Первый из них, называемый кинематическим, был применен еще на электровазах ЧС4. Этот способ предусматривает установку гасителя под углом к вертикали. Тогда динамические силы, действующие на гаситель, вызывают его дополнительный поворот относительно вертикальной оси, что снижает силы, действующие на внутренние детали гасителя.

Второй способ предусматривает установку последовательно с гидравлическим гасителем пружины [1, 2], что соответствует подпружиненному, или упругозащищенному гасителю колебаний. Этот способ позволяет существенно изменить динамические свойства рессорного комплекта, значительно понизив полосу пропускаемых частот, что уменьшает динамические силы, действующие на элементы гасителя. Особенности конструкции буксовой ступени подвешивания электроваза 2ЭС5К свидетельствуют о том, что без существенных переделок конструкции здесь может быть применен упругозащищенный гаситель колебаний. В этой схеме гаситель, имеющий коэффициент демпфирования β , устанавливается параллельно с буксовой пружиной с жесткостью $\mathcal{K}_1$. Кроме того, последовательно с этим гасителем включена пружина $\mathcal{K}_{1-1}$ (рис. 1).

В [1, 2] приведено описание динамических свойств такой схемы в частотной области. Однако для решения задач динамики рельсового экипажа с упругозащищенным гидравлическим гасителем определенным интерес представляет описание работы схемы, приведенной на рис. 1, а, в области времени.

Методы и материалы. Для описания работы схемы с упругозащищенным гасителем колебаний составим систему уравнений, позволяющих определить суммарную силу F_Σ комплекта такого рессорного подве-

шивания, используя подходы, примененные при выводе формул для параллельного и последовательного соединения пружин, а также расчетную схему (рис. 2). Силу F_Σ можно определить как сумму упругой силы $F_{y1} = \mathcal{K}_1 \Delta_1$, создаваемой пружиной с жесткостью $\mathcal{K}_1$, и диссипативной силы $F_{d1} = \beta_1 \dot{\Delta}_3$, развиваемой гасителем колебаний:

$$F_\Sigma = F_{y1} + F_{d1} = \mathcal{K}_1 \Delta_1 + \beta_1 \dot{\Delta}_3, \quad (1)$$

где Δ_1 — деформация пружины $\mathcal{K}_1$, или перемещение между верхней и нижней точками схемы; $\dot{\Delta}_3$ — скорость деформации Δ_3 между верхней точкой и точкой А; β_1 — коэффициент демпфирования гасителя колебаний 1-й ступени.

В этом выражении неизвестна величина $\dot{\Delta}_3$. Найдем ее из условия, что силы, действующие на точку А от гасителя колебаний $F_{d1} = \beta_1 \dot{\Delta}_3$ и пружины $\mathcal{K}_{1-1}$, равны:

$$\beta_1 \dot{\Delta}_3 = \mathcal{K}_{1-1} \Delta_2, \text{ откуда } \dot{\Delta}_3 = \frac{\mathcal{K}_{1-1}}{\beta_1} \Delta_2.$$

Деформацию пружины $\mathcal{K}_{1-1}$ Δ_2 найдем из следующего очевидного соотношения: $\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3$. Отсюда $\Delta_2 = \Delta_1 - \Delta_3$. Используя эти выражения, запишем систему уравнений, решая которую можно найти силу F_Σ :

$$\begin{cases} F_\Sigma = \mathcal{K}_1 \Delta_1 + \beta_1 \dot{\Delta}_3; \\ \Delta_3 = \Delta_1 - \Delta_2; \\ \Delta_2 = \frac{\beta_1}{\mathcal{K}_{1-1}} \dot{\Delta}_3. \end{cases} \quad (2)$$

Эту систему уравнений будем использовать в дальнейшем при исследовании колебаний упрощенной модели электроваза 2ЭС5К с упругозащищенным гидравлическим гасителем по рис. 1, а.

Для оценки эффективности применения в буксовом подвешивании упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний выполним сравнение случайных вертикальных колебаний первой ступени рессорного подвешивания, а также крутильных колебаний в тяговой передаче. При этом будем рассматривать два варианта исполнения этой ступени — с типовой схемой установки гидравлического гасителя колебаний и с упругозащищенным гасителем (рис. 1, а), а также учитывать дискретную модель пути, параметры которой приведены в [1].

Расчетная схема для первого варианта (рис. 3) учитывает вертикальные колебания правого $z_{\text{кпр}}$ и левого $z_{\text{кл}}$ колеса колесной пары, тележки z_2 и кузова z_3 , боковую качку колесной пары $\varphi_{\text{ккп}}$, а также угловые колебания остова тягового электродвигателя (ТЭД) $\varphi_{\text{дв}}$, крутильные колебания якоря ТЭД $\varphi_{\text{я}}$, правого $\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}$ и левого $\varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}$ колеса колесной пары (рис. 4).

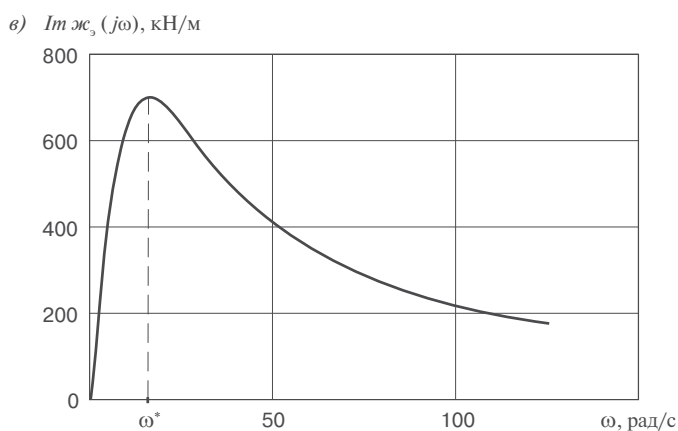
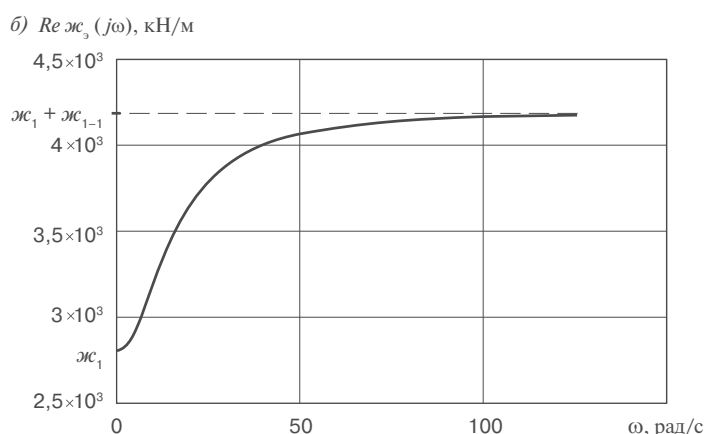
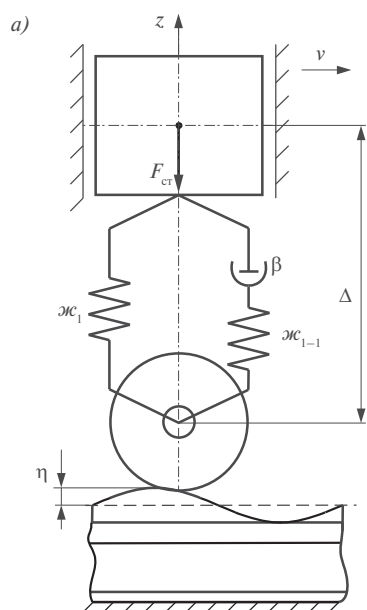


Рис. 1. Схема рессорного подвешивания с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний (а), его упругая (б) и диссипативная (в) характеристики:

$F_{ст}$ — статическая сила (сила тяжести); Δ — деформация пружины $jс_1$; $jс_1$ — жесткость пружины; $jс_{1-1}$ — жесткость пружины; β — коэффициент демпфирования; η — неровность рельса; ω — круговая частота; v — скорость движения; z — подпрыгивание

Fig. 1. Diagram of spring suspension with an elastically protected hydraulic vibration damper (a), its elastic (b) and dissipative (c) characteristics: $F_{ст}$ — static force (gravity); Δ — deformation of the spring $jс_1$; $jс_1$ — stiffness of the spring; $jс_{1-1}$ — stiffness of the spring; β — damping factor; η — unevenness of the rail; ω — circular frequency; v — movement speed; z — bounce (vertical movement)

Координата кузова z_3 принимается равной нулю. Это соответствует тому, что кузов рассматривается как заделка, а жесткость и затухание кузовной ступени колебаний учитываются. Такое допущение принято потому, что собственные частоты колебаний кузова составляют не более 1,5 Гц, и его колебания не будут влиять на колебания тележки, колесной пары и крутильные колебания в тяговой передаче, собственные частоты которых более чем в четыре раза превышают эту величину. Кроме того, координата вертикального перемещения центра масс колесной пары z_1 равна

$$z_1 = z_n + \eta, \quad (3)$$

где z_n — перемещение рельса (деформация пути); η — неровность рельса — возмущение, вызывающее колебания исследуемой системы.

Таким образом, колебания исследуемой системы (рис. 3 и 4) могут быть описаны следующими десятью координатами:

$$z_n; \eta; z_1; \varphi_{упр}^{лин}; \varphi_{ул}^{лин}; \varphi_{хкп}; \varphi_{дв}; \varphi_{я}; z_2; z_{дв},$$

где $z_{дв}$ — подпрыгивание корпуса двигателя.

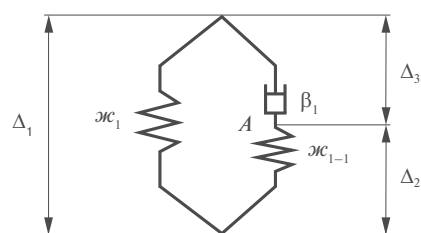


Рис. 2. Расчетная схема буксовой ступени с подпружиненным гасителем колебаний: Δ_1 — деформация пружины $jс_1$, т. е. перемещение между верхней и нижней точками; Δ_2 — деформация пружины $jс_{1-1}$, т. е. перемещение между точкой А и нижней точкой; Δ_3 — перемещение между верхней точкой и точкой А; β_1 — коэффициент демпфирования гасителя колебаний 1-й ступени

Fig. 2. Calculation scheme of the axlebox stage with a spring-loaded vibration damper: Δ_1 — deformation of the spring $jс_1$, i. e. movement between the upper and lower points; Δ_2 — deformation of the spring $jс_{1-1}$, i. e. movement between point A and the lower point; Δ_3 — movement between the upper point and point A; β_1 — damping coefficient of the vibration damper of the 1st stage

Введем следующие замены:

$$\begin{aligned} z_{\Pi} &= z_1 - \eta; \\ z_1 &= r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2; \\ \varphi_{\text{хкп}} &= r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2s_{\text{зк}}; \\ z_{\text{кпр}} &= z_1 + \varphi_{\text{хкп}} s = r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \\ &+ r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2s_{\text{зк}}; \\ z_{\text{кл}} &= z_1 - \varphi_{\text{хкп}} s = r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - \\ &- r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2s_{\text{зк}}; \\ z_{\text{дв}} &= z_1 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}} = r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}}, \end{aligned}$$

где $r_{\text{зк}}$ — радиус зубчатого колеса; $2s_{\text{зк}}$ — расстояние между зубчатыми колесами одной колесной пары; $2s$ — расстояние между крутами катания колес колесной пары; $a_{\text{д2}}$ — расстояние от оси колесной пары до подвески ТЭД.

Таким образом, колебания исследуемой системы окончательно будем описывать пятью координатами $\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}$, $\varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}$, $\varphi_{\text{дв}}$, $\varphi_{\text{я}}$, z_2 . Следовательно, система будет иметь 5 степеней свободы. Тогда кинетическая энергия Т системы будет равна

$$\begin{aligned} T &= m_2 \frac{\dot{z}_2^2}{2} + m_1 \frac{[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2]^2}{2} + \\ &+ J_{\text{хкп}} \frac{[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2s_{\text{зк}}]^2}{2} + \\ &+ \frac{m_{\Pi}}{2} \frac{[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2s_{\text{зк}} - \dot{\eta}_{\text{пр}}]^2}{2} + \\ &+ \frac{m_{\Pi}}{2} \frac{[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2s_{\text{зк}} - \dot{\eta}_{\text{л}}]^2}{2} + \\ &+ m_{\text{дв}} \frac{[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \dot{\varphi}_{\text{дв}} a_{\text{д2}}]^2}{2} + \\ &+ \left[J_{\text{удв}} + 2J_{\text{ур}} + \left(J_{\text{уя}} + 2J_{\text{уш}} + \frac{2}{\mu^2} J_{\text{узк}} \right) (\mu + 1)^2 \right] \times \\ &\times \frac{\dot{\varphi}_{\text{дв}}^2}{2} + J_{\text{уя}} \frac{\dot{\varphi}_{\text{я}}^2}{2} + (J_{\text{ук}} + J_{\text{узк}} + \mu^2 J_{\text{уш}}) \frac{(\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}})^2}{2} + \\ &+ (J_{\text{ук}} + J_{\text{узк}} + \mu^2 J_{\text{уш}}) \frac{(\dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}})^2}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где m_1 , m_2 — масса колесной пары и рамы тележки, приходящаяся на одну ось, соответственно; m_{Π} — сосредоточенная масса пути; $m_{\text{дв}}$ — масса ТЭД; μ — передаточное число редуктора; $J_{\text{удв}}$, $J_{\text{ур}}$, $J_{\text{уя}}$, $J_{\text{уш}}$, $J_{\text{ук}}$, $J_{\text{узк}}$ — моменты инерции относительно оси у остова ТЭД, редуктора, якоря ТЭД, шестерни редуктора, колеса колесной пары, зубчатого колеса соответственно; $J_{\text{хкп}}$ — момент инерции колесной пары относительно оси х.

На основе выражения (4) определим силы инерции и моменты сил инерции:

1. Для координаты рамы тележки z_2 :

$$F_{z_2}^{\text{ин}} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_2} \right) = -m_2 \ddot{z}_2. \quad (5)$$

2. Для координаты правого колеса $\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}$:

$$\begin{aligned} M_{\text{упр}}^{\text{ин}} &= -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}}} \right) = \\ &= -\frac{m_1 r_{\text{зк}}^2}{4} (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) - J_{\text{хкп}} \frac{r_{\text{зк}}^2}{4s_{\text{зк}}^2} (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) - \\ &- \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}^2}{2} + \frac{r_{\text{зк}}^2 s^2}{2s_{\text{зк}}^2} \right) \ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}^2}{2} - \frac{r_{\text{зк}}^2 s^2}{2s_{\text{зк}}^2} \right) \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}} + \\ &+ \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}}{2} + \frac{r_{\text{зк}} s}{2s_{\text{зк}}} \right) \ddot{\eta}_{\text{пр}} - \frac{m_{\Pi}}{2} \left(-\frac{r_{\text{зк}}}{2} + \frac{r_{\text{зк}} s}{2s_{\text{зк}}} \right) \ddot{\eta}_{\text{л}} - \\ &- \frac{m_{\text{дв}} r_{\text{зк}}^2}{4} (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) - \frac{m_{\text{дв}} a_{\text{д2}} r_{\text{зк}}}{2} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} - \\ &- (J_{\text{ук}} + J_{\text{узк}} + \mu^2 J_{\text{уш}}) \ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}}. \end{aligned} \quad (6)$$

3. Для координаты левого колеса $\varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}$ аналогично:

$$\begin{aligned} M_{\text{ул}}^{\text{ин}} &= -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}} \right) = \frac{m_1 r_{\text{зк}}^2}{4} (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) + \\ &+ J_{\text{хкп}} \frac{r_{\text{зк}}^2}{4s_{\text{зк}}^2} (\ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}}) + \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}^2}{2} - \frac{r_{\text{зк}}^2 s^2}{2s_{\text{зк}}^2} \right) \ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \\ &+ \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}^2}{2} + \frac{r_{\text{зк}}^2 s^2}{2s_{\text{зк}}^2} \right) \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}} - \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}}{2} - \frac{r_{\text{зк}} s}{2s_{\text{зк}}} \right) \ddot{\eta}_{\text{пр}} - \\ &- \frac{m_{\Pi}}{2} \left(\frac{r_{\text{зк}}}{2} + \frac{r_{\text{зк}} s}{2s_{\text{зк}}} \right) \ddot{\eta}_{\text{л}} + \frac{m_{\text{дв}} r_{\text{зк}}^2}{4} (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) + \\ &+ \frac{m_{\text{дв}} a_{\text{д2}} r_{\text{зк}}}{2} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} + (J_{\text{ук}} + J_{\text{узк}} + \mu^2 J_{\text{уш}}) \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}. \end{aligned} \quad (7)$$

4. Для координаты остова ТЭД $\varphi_{\text{дв}}$:

$$\begin{aligned} M_{\text{дв}}^{\text{ин}} &= -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_{\text{дв}}} \right) = - \left[m_{\text{дв}} a_{\text{д2}}^2 + J_{\text{удв}} + 2J_{\text{ур}} + \right. \\ &+ (\mu + 1)^2 \left(J_{\text{уя}} + \frac{2}{\mu^2} J_{\text{узк}} + 2J_{\text{уш}} \right) \left. \right] \ddot{\varphi}_{\text{дв}} - m_{\text{дв}} \frac{r_{\text{зк}} a_{\text{д2}}}{2} \times \\ &\times (\ddot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \ddot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}). \end{aligned} \quad (8)$$

5. Для координаты якоря ТЭД $\varphi_{\text{я}}$:

$$M_{\text{я}}^{\text{ин}} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_{\text{я}}} \right) = -J_{\text{уя}} \ddot{\varphi}_{\text{я}}. \quad (9)$$

Уравнения колебаний этой системы запишем в соответствии с расчетными схемами (рис. 3 и 4):

1. Уравнение колебаний подпрыгивания рамы тележки m_2 :

$$\begin{aligned} -m_2 \ddot{z}_2 - 2\beta_2 \dot{z}_2 - 2\mathcal{K}_2 z_2 + 2\beta_1 \left[r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - \dot{z}_2 \right] + \\ + 4\mathcal{K}_1 \left[\left(r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 \right) - z_2 \right] + \\ + \mathcal{K}_{\text{дв}} \left[-z_2 + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}} \right] + \\ + \beta_{\text{дв}} \left[-\dot{z}_2 + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \dot{\varphi}_{\text{дв}} a_{\text{д2}} \right] = 0. \quad (10) \end{aligned}$$

2. Уравнение угловых колебаний правого колеса $\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}$:

$$\begin{aligned} -M_{\text{упр}}^{\text{ин}} + \frac{\mathcal{K}_{\text{п}}}{2} r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \eta_{\text{пр}}) + \frac{\beta_{\text{п}}}{2} r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \dot{\eta}_{\text{пр}}) - \beta_1 r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \dot{z}_2) - 2\mathcal{K}_1 r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - z_2) - \mathcal{K}_{\text{я1}} \mu [\varphi_{\text{я}} - (\mu + 1) \varphi_{\text{дв}} - \\ - \mu \varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}] - \beta_{\text{я1}} \mu [\dot{\varphi}_{\text{я}} - (\mu + 1) \dot{\varphi}_{\text{дв}} - \mu \dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}}] + \\ + \mathcal{K}_{\text{кп}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) + \beta_{\text{кп}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) + \\ + \frac{\mathcal{K}_{\text{дв}}}{2} a_{\text{д2}} (-z_2 + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) + \\ + \frac{\beta_{\text{дв}}}{2} a_{\text{д2}} (-\dot{z}_2 + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \dot{\varphi}_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) = \\ = -M_{\text{сипр}}, \quad (11) \end{aligned}$$

где $M_{\text{сипр}}$ — момент сцепления правого колеса.

3. Уравнение угловых колебаний левого колеса $\varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}$:

$$\begin{aligned} -M_{\text{ул}}^{\text{ин}} + \frac{\mathcal{K}_{\text{п}}}{2} r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - \right. \\ - r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \eta_{\text{л}}) + \\ + \frac{\beta_{\text{п}}}{2} r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \dot{\eta}_{\text{л}}) - \right. \\ - \beta_1 r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - \dot{z}_2) - \right. \\ - 2\mathcal{K}_1 r_{\text{зк}} \left(r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 - r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) s / 2 s_{\text{зк}} - z_2) - \right. \\ - \mathcal{K}_{\text{я2}} \mu [\varphi_{\text{я}} - (\mu + 1) \varphi_{\text{дв}} - \mu \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}] - \beta_{\text{я2}} \mu [\dot{\varphi}_{\text{я}} - (\mu + 1) \dot{\varphi}_{\text{дв}} - \\ - \mu \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}] - \mathcal{K}_{\text{кп}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) - \beta_{\text{кп}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} - \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) + \\ + \frac{\mathcal{K}_{\text{дв}}}{2} a_{\text{д2}} (-z_2 + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) + \\ + \frac{\beta_{\text{дв}}}{2} a_{\text{д2}} (-\dot{z}_2 + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \dot{\varphi}_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) = \\ = -M_{\text{сйл}}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $M_{\text{сйл}}$ — момент сцепления левого колеса.

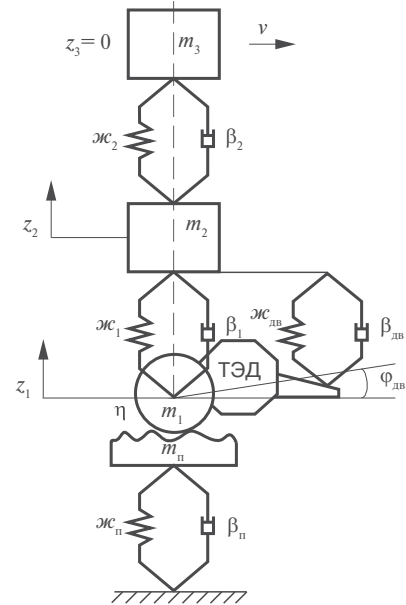


Рис. 3. Расчетная схема колебаний упрощенной модели электровоза 2ЭС5К с типовой схемой рессорного подвешивания: m_1 — масса колесной пары; m_2 — масса рамы тележки, приходящаяся на одну ось; m_3 — масса кузова, приходящаяся на одну ось; $m_{\text{п}}$ — сосредоточенная масса пути; $\mathcal{K}_{\text{п}}$ — жесткость пути; $\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2$ — жесткости пружины 1-й и 2-й ступени соответственно; $\mathcal{K}_{\text{дв}}$ — жесткость подвески ТЭД; β_1, β_2 — коэффициенты демпфирования гасителя колебаний 1-й и 2-й ступени соответственно; $\beta_{\text{дв}}$ — коэффициент демпфирования подвески ТЭД; z_1 — подпрыгивание колесной пары; z_2 — подпрыгивание рамы тележки; z_3 — подпрыгивание кузова; $\varphi_{\text{дв}}$ — угловые колебания остова ТЭД

Fig. 3. Calculation scheme of the simplified model vibrations of the 2ES5K electric locomotive with a typical layout of spring suspension:

m_1 — mass of the wheelset; m_2 — mass of the bogie frame per axle; m_3 — mass of the body per axle; $m_{\text{п}}$ — concentrated mass of the track; $\mathcal{K}_{\text{п}}$ — track stiffness; $\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2$ — spring stiffness of the 1st and 2nd stages, respectively; $\mathcal{K}_{\text{дв}}$ — tractive motor suspension stiffness; β_1, β_2 — damping coefficient of the track; β_1, β_2 — damping coefficients of the vibration damper of the 1st and 2nd stages, respectively; $\beta_{\text{дв}}$ — coefficient of damping of the tractive motor suspension; z_1 — bounce of the wheelset; z_2 — bounce of the bogie frame; z_3 — bounce of the body; $\varphi_{\text{дв}}$ — angular oscillations of the tractive motor frame

4. Уравнения угловых колебаний остова ТЭД $\varphi_{\text{дв}}$:

$$\begin{aligned} M_{\text{дв}}^{\text{ин}} - \mathcal{K}_{\text{я1}} (\mu + 1) [\varphi_{\text{я}} - (\mu + 1) \varphi_{\text{дв}} - \mu \varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}}] - \\ - \beta_{\text{я1}} (\mu + 1) [\dot{\varphi}_{\text{я}} - (\mu + 1) \dot{\varphi}_{\text{дв}} - \mu \dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}}] - \\ - \mathcal{K}_{\text{я2}} (\mu + 1) [\varphi_{\text{я}} - (\mu + 1) \varphi_{\text{дв}} - \mu \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}] - \\ - \beta_{\text{я2}} (\mu + 1) [\dot{\varphi}_{\text{я}} - (\mu + 1) \dot{\varphi}_{\text{дв}} - \mu \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}] - \\ - \mathcal{K}_{\text{дв}} a_{\text{д2}} (-z_2 + r_{\text{зк}} (\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \varphi_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) - \\ - \beta_{\text{дв}} a_{\text{д2}} (-\dot{z}_2 + r_{\text{зк}} (\dot{\varphi}_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \dot{\varphi}_{\text{ул}}^{\text{дин}}) / 2 + \dot{\varphi}_{\text{дв}} a_{\text{д2}}) = 0. \quad (13) \end{aligned}$$

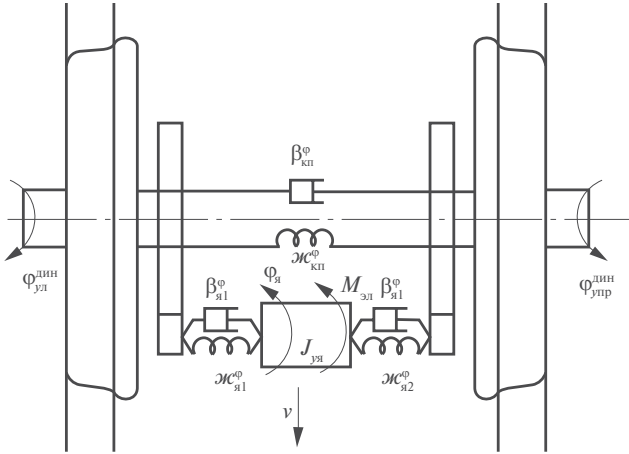


Рис. 4. Кинематическая схема колесно-моторного блока:
 $J_{я1}^{\phi}$ и $J_{я2}^{\phi}$ — угловые жесткости правой и левой стороны вала якоря соответственно; $J_{кп}^{\phi}$ — угловая жесткость оси колесной пары;
 $\beta_{я1}$ и $\beta_{я2}$ — коэффициенты демпфирования правой и левой стороны вала якоря соответственно; $\beta_{кп}$ — коэффициент демпфирования оси колесной пары; $J_{уя}$ — момент инерции якоря ТЭД

Fig. 4. Kinematic diagram of the wheel-motor assembly:
 $J_{я1}^{\phi}$ and $J_{я2}^{\phi}$ — angular stiffnesses of the right and left sides of the armature shaft, respectively; $J_{кп}^{\phi}$ — angular rigidity of the wheelset axle;
 $\beta_{я1}$ and $\beta_{я2}$ — damping coefficients of the right and left sides of the armature shaft, respectively; $\beta_{кп}$ — damping coefficient of the wheelset axle;
 $J_{уя}$ — momentum of the tractive motor armature; $\phi_{уя}^{\text{дин}}$, $\phi_{уя}^{\text{дин}}$ — angular oscillations of the right and left wheels, respectively; $\phi_{я}$ — torsional vibrations of the tractive motor armature

5. Уравнение крутильных колебаний якоря ТЭД $\phi_{я}$:

$$\begin{aligned} J_{уя} \ddot{\phi}_{я} - J_{я1}^{\phi} [\phi_{я} - (\mu + 1) \phi_{дв} - \mu \phi_{уя}^{\text{дин}}] - \\ - \beta_{я1}^{\phi} [\dot{\phi}_{я} - (\mu + 1) \dot{\phi}_{дв} - \mu \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}] - \\ - J_{я2}^{\phi} [\phi_{я} - (\mu + 1) \phi_{дв} - \mu \phi_{уя}^{\text{дин}}] - \\ - \beta_{я2}^{\phi} [\dot{\phi}_{я} - (\mu + 1) \dot{\phi}_{дв} - \mu \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}] = -M_{эл}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $M_{эл}$ — электромагнитный момент ТЭД:

$$M_{эл} = \frac{F_k r_k}{n \mu \kappa_{дв}}, \quad (15)$$

значение которого по этой формуле определялось по зависимости силы тяги от скорости движения $F_k(v)$ (по тяговой характеристике — см. прил. 4 в ПТР [3]) для заданной скорости движения и значений радиуса колеса r_k , количества осей n , передаточного числа редуктора μ и КПД тягового электродвигателя НБ514 $\kappa_{дв} = 0,943$, соответствующих электровозу 2ЭС5К.

Определим момент сцепления колеса [4]:

$$M_{сшп(л)} = r_k \psi(\epsilon_{пр(л)}, v) \Pi_{пр(л)}, \quad (16)$$

где Π — нагрузка от колеса на рельс.

$$\Pi = \Pi^{\text{ст}} + \Pi^{\text{дин}}:$$

$$\begin{aligned} \Pi_{пр}^{\text{дин}} = \frac{\mathcal{K}_n}{2} r_{зк} \left[r_{зк} (\phi_{уя}^{\text{дин}} + \phi_{уя}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ \left. + r_{зк} (\phi_{уя}^{\text{дин}} - \phi_{уя}^{\text{дин}}) s / 2 s_{зк} - \eta_{пр} \right] + \\ + \frac{\beta_n}{2} r_{зк} \left[r_{зк} (\dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}} + \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}) / 2 + \right. \\ \left. + r_{зк} (\dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}} - \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}) s / 2 s_{зк} - \dot{\eta}_{пр} \right]; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{л}^{\text{дин}} = \frac{\mathcal{K}_n}{2} r_{зк} \left(r_{зк} (\phi_{уя}^{\text{дин}} + \phi_{уя}^{\text{дин}}) / 2 - \right. \\ \left. - r_{зк} (\phi_{уя}^{\text{дин}} - \phi_{уя}^{\text{дин}}) s / 2 s_{зк} - \eta_{л} \right) + \\ + \frac{\beta_n}{2} r_{зк} \left(r_{зк} (\dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}} + \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}) / 2 - \right. \\ \left. - r_{зк} (\dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}} - \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}) s / 2 s_{зк} - \dot{\eta}_{л} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение $\psi(\epsilon_{пр(л)}, v)$ представляет собой зависимость коэффициента сцепления от относительных скоростей скольжения ϵ левого и правого колеса и скорости движения поезда v . Относительные линейные скорости скольжения правого и левого колеса определяются по формулам

$$\epsilon_{пр} = \frac{v_{скп}}{v + v_{скп}} \text{ и } \epsilon_{л} = \frac{v_{скл}}{v + v_{скл}}, \quad (19)$$

где $v_{скп} = r_k \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}$ и $v_{скл} = r_k \dot{\phi}_{уя}^{\text{дин}}$ — линейные скорости скольжения на ободах правого и левого колеса соответственно.

Тогда коэффициенты сцепления будут равны

$$\psi(\epsilon_{пр(л)}, v) = \psi_0(\epsilon_{пр(л)}) \psi(v), \quad (20)$$

где $\psi_0(\epsilon_{пр(л)})$ — коэффициент сцепления в относительных единицах; $\psi(v)$ — коэффициент сцепления, зависящий от линейной скорости движения.

$$\psi_0(\epsilon_{пр(л)}) = \frac{\psi(\epsilon_{пр(л)})}{\psi_6}, \quad (21)$$

где $\psi(\epsilon_{пр(л)})$ — коэффициент сцепления, зависящий от скорости скольжения колеса; ψ_6 — наибольшее значение коэффициента сцепления ($\psi_6 = 0,2519$).

Коэффициент сцепления $\psi(\epsilon_{пр(л)})$ при проведении расчетов задавался в виде зависимости, предложенной А. Л. Голубенко [5]:

$$\psi(\epsilon_{пр(л)}) = a \left(\frac{\epsilon_{пр(л)}}{\epsilon_{кр}} \right)^b e^{-c \frac{\epsilon_{пр(л)}}{\epsilon_{кр}}}, \quad (22)$$

где $\epsilon_{кр}$ — критическое значение скорости скольжения ($\epsilon_{кр} = 0,04$); a , b , c — эмпирические коэффициенты ($a = 0,34$; $b = 0,3$; $c = 0,3$).

Зависимость коэффициента сцепления $\psi(v)$ от линейной скорости задавалась согласно [3] по выражению

$$\psi(v) = 0,275 + \frac{3,92}{50 + 6v} - 0,00059v. \quad (23)$$

При разработке математической модели колебаний упрощенной системы с упругозащищенным гасителем колебаний рассматривалась расчетная схема, представленная на рис. 5. В отличие от рис. 3 на этой схеме в буксовом подвешивании применен упругозащищенный гидравлический гаситель колебаний (рис. 1, а) с последовательно включенной пружиной жесткостью $\mathcal{M}_{1-1}$. Координата z_3 в этой схеме равна нулю, и кузов рассматривается как заделка, так же как и в предыдущем варианте. Описание упругозащищенного гасителя было выполнено при помощи уравнений (2). Все остальные обозначения такие же, как и в предыдущем варианте. Поэтому уравнения колебаний этой схемы будут отличаться от предыдущих только тем, что вместо слагаемых с параметрами β_1 и $\mathcal{M}_1$ будет учитываться сила F_Σ , определяемая из решения системы уравнений (2).

Для расчета случайных процессов колебаний и последующего определения их характеристик в качестве возмущения в соответствии с руководящими документами [6] был выбран высокочастотный случайный процесс возмущения $\eta(x = vt)$ со спектральной плотностью

$$\bar{G}_\eta(\omega) = \bar{C}_0\omega^{-4} + \bar{C}_2\omega^{-2}, \quad (24)$$

где $\bar{C}_0$ и $\bar{C}_2$ — коэффициенты, зависящие от осевой нагрузки 2П, кН и скорости движения экипажа v , м/с.

$$\bar{C}_0(v) = (33,6v + 3,57v^2) \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2 / \text{с}^3 \cdot \text{рад}^3; \quad (25)$$

$$\bar{C}_2 = 8,9 \cdot 10^9 \cdot 2П, \text{ м}^2 / \text{с} \cdot \text{рад}. \quad (26)$$

График (рис. 6) выражения (24) показывает, что при изменении частоты в 10 раз от 10 до 100 Гц ордината спектральной плотности уменьшается примерно в 100 раз от $1,5 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-11}$.

При задании такого возмущения установившиеся колебания приведенных моделей можно будет рассматривать как реализации стационарных и эргодических случайных процессов $X_i(t)$ длительностью t_p , при вероятностном анализе которых определяют следующие числовые характеристики [7]:

1. Среднее значение (математическое ожидание):

$$\bar{x}_i = \sum_{k=0}^N x_i(kT), \quad (27)$$

где T — шаг дискретизации случайного процесса; k и N — номер шага и число шагов дискретизации соответственно, $N = t_p/T$.

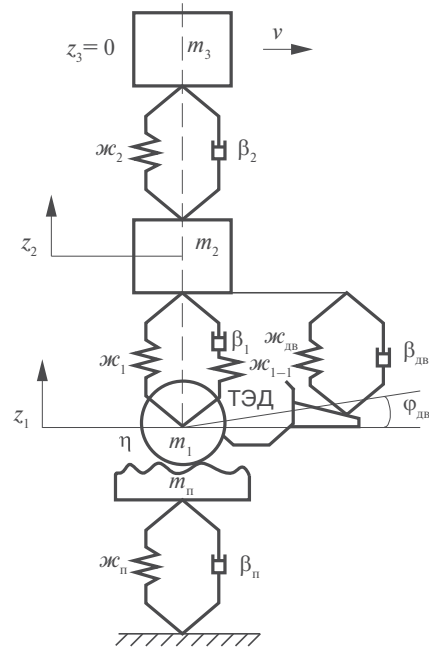


Рис. 5. Расчетная схема колебаний упрощенной модели электровоза 2ЭС5К с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний в буксовой ступени рессорного подвешивания

Fig. 5. Calculation model of the simplified model vibrations of the 2ES5K electric locomotive with an elastically protected hydraulic vibration damper in the axlebox stage of the spring suspension

2. Дисперсия:

$$S_x^2 = \sum_{k=0}^N [x_i(kT) - \bar{x}_i]^2 = \sum_{k=0}^N [\hat{x}_i(kT)]^2, \quad (28)$$

где $\hat{x}_i(kT)$ — центрированное значение случайного процесса $X_i(t)$; S_x — среднеквадратическое отклонение.

3. Автокорреляционная функция:

$$R_x[iT] = \frac{1}{N-s} \sum_{k=1}^{N-s} x[kT]x[(k+i)T], \quad (29)$$

где $iT = \tau$ — сдвиг по времени между значениями реализации, а $sT = (0,1 \div 0,25)NT$ — максимально допустимая величина этого сдвига.

4. Спектральная плотность:

$$G_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (30)$$

По спектральной плотности определяют ее начальные моменты k -го порядка m_k , а также такие числовые характеристики случайных процессов, как эффективная частота f_e , коэффициент широкополосности Θ и среднее значение абсолютных максимумов $\bar{H}_a$:

$$m_k = (2\pi)^k \int_0^\infty f^k G_x(f) df; \quad (31)$$

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \quad (32)$$

причем $m_0 = \int_0^\infty G_x(f) df = S_x^2$;

$$\bar{H}_a = \bar{x} + S_x \left(\sqrt{2 \ln f_e t_p} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln f_e t_p}} \right). \quad (33)$$

Результаты. Решение системы дифференциальных уравнений было выполнено в программном пакете MatLab — Simulink [8, 9] численным интегрированием с помощью метода Рунге — Кутты IV порядка.

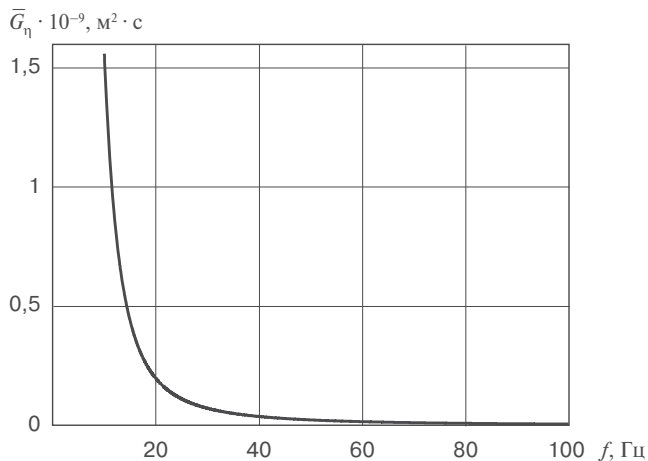


Рис. 6. График усредненной спектральной плотности геометрической неровности пути по выражению (24)

Fig. 6. Graph of the averaged spectral density of the path geometric roughness according to the expression (24)

Результаты исследования упрощенной модели с типовой схемой рессорного подвешивания показали, что случайные процессы колебаний по различным обобщенным координатам при действии высокочастотного возмущения со спектральной плотностью (24) близки между собой. Поэтому для примера на рис. 7 и 8 приведены реализации таких процессов для координат $z_1(t) = r_{\text{жк}}(\varphi_{\text{упр}}^{\text{дин}} + \varphi_{\text{ул}}^{\text{дин}})/2$ и $\varphi_a(t)$. Вместе с тем случайные процессы сил $F_{\text{длсх}}(t) = \beta_1 \dot{\Delta}_1 = \beta_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)$, действующих на гидравлический гаситель колебаний (рис. 9), являются более высокочастотными.

Для проведения спектрального анализа все процессы были центрированы. Корреляционные функции $R_x(\tau)$ этих процессов быстро затухают, а спектральные плотности $G_x(f)$ повторяют в основном особенности спектральной плотности возмущения (рис. 6) в диапазоне частот 10–20 Гц. Числовые характеристики (27)–(33) исследованных случайных процессов колебаний узлов ходовой части, приведенные в табл. 1, показывают, что их эффективные частоты лежат в диапазоне 15–17 Гц.

Отметим, что диссипативная сила гидравлического гасителя колебаний $F_{\text{длсх}}(t)$ в этом диапазоне частот будет весьма большой, так как она пропорциональна частоте колебаний. Для этого процесса эффективная частота f_e стала существенно выше и достигает ~27,4 Гц, а среднеквадратическое отклонение — 14 100 Н. Этим объясняется и высокое среднее значение абсолютного максимума для $F_{\text{длсх}}(t)$, которое достигает $\bar{H}_a = 56\,000$ Н, что и приводит к частым отказам буксовых гидравлических гасителей колебаний.

Таблица 1

Числовые характеристики случайных колебаний узлов ходовой части локомотива

Table 1

Numerical characteristics of random vibrations of locomotive chassis

Узлы ходовой части локомотива	Среднеквадратическое отклонение S		Эффективная частота f_e , Гц		Среднее значение абсолютного максимума $\bar{H}_a$	
	Типовая схема	Схема с УЗБГ	Типовая схема	Схема с УЗБГ	Типовая схема	Схема с УЗБГ
Рама тележки	0,0013 м	0,0012 м	15,6805	16,9310	0,0050 м	0,0045 м
Якорь ТЭД	0,0226 рад	0,0217 рад	15,3143	15,6526	0,0863 рад	0,0832 рад
Правое колесо	0,0057 рад	0,0054 рад	15,1405	15,4619	0,0219 рад	0,0208 рад
Левое колесо	0,0057 рад	0,0054 рад	15,5574	15,8678	0,0218 рад	0,0208 рад
Корпус ТЭД	$5,0041 \cdot 10^{-4}$ рад	$5,1584 \cdot 10^{-4}$ рад	15,2404	15,6763	0,0019 рад	0,0020 рад
Колесная пара	0,0027 м	0,0026 м	15,2873	15,6352	0,0103 м	0,0098 м

Примечание. УЗБГ — упругозащищенный буксовый гаситель.

Note. УЗБГ — elastically protected box damper.

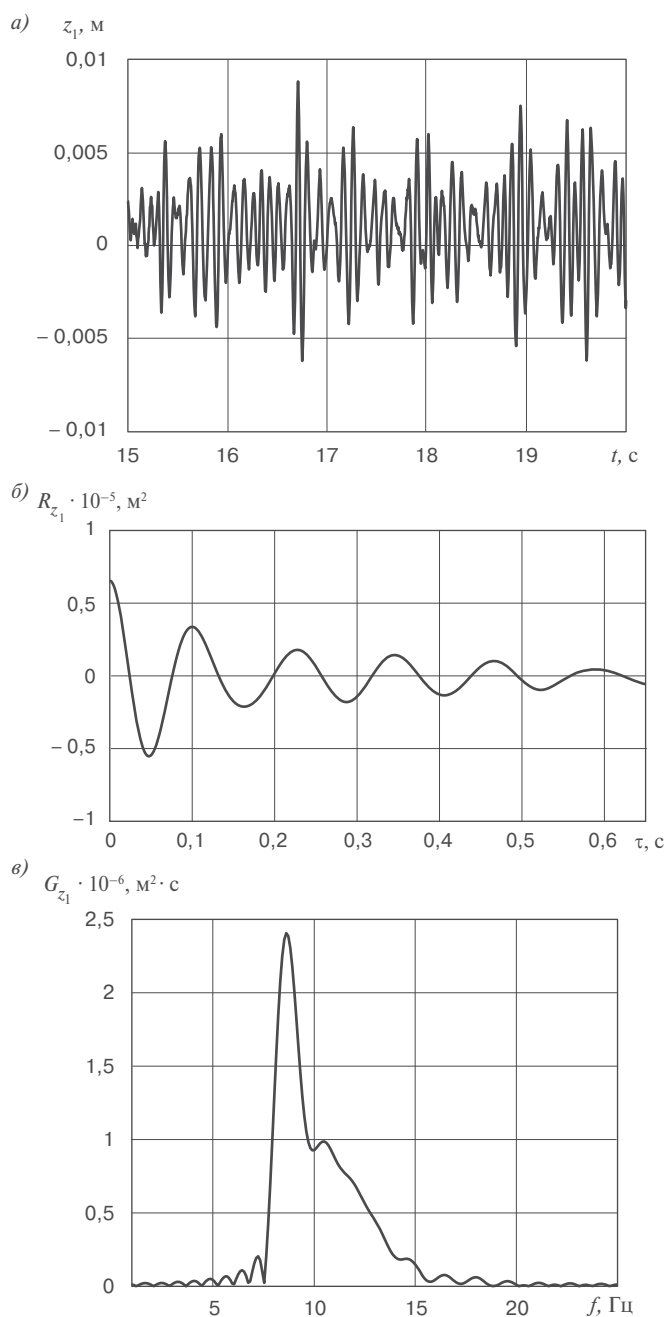


Рис. 7. Фрагмент реализации (а), автокорреляционная функция (б) и спектральная плотность (в) случайного процесса колебаний подпрыгивания колесной пары

Fig. 7. Fragment of implementation (a), autocorrelation function (b) and spectral density (c) of a random process of wheelset vertical oscillations

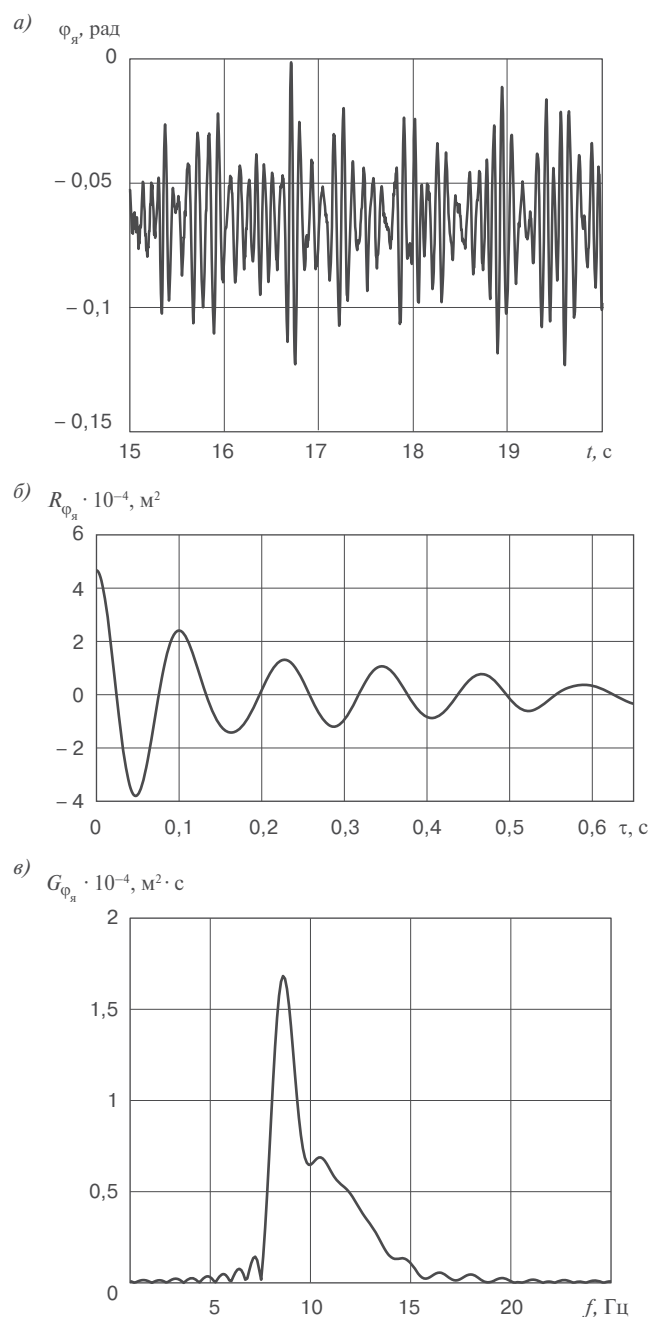


Рис. 8. Фрагмент реализации (а), автокорреляционная функция (б) и спектральная плотность (в) случайного процесса угловых колебаний якоря ТЭД

Fig. 8. Fragment of implementation (a), autocorrelation function (b) and spectral density (c) of a random process of tractive motor armature angular oscillations

Результаты исследования случайных колебаний упрощенной модели с упругозащищенным гасителем колебаний показали, что числовые характеристики случайных колебаний всех координат, кроме $z_2(t)$ и $F_{дл\text{уз}}(t)$ (рис. 10), практически не изменились. При этом их корреляционные функции

и спектральные плотности также близки к характеристикам, полученным в первом варианте расчетов с исходной схемой включения гидравлического гасителя колебаний.

Рассмотрим подробнее, как повлияло применение упругозащищенного гидравлического гасителя

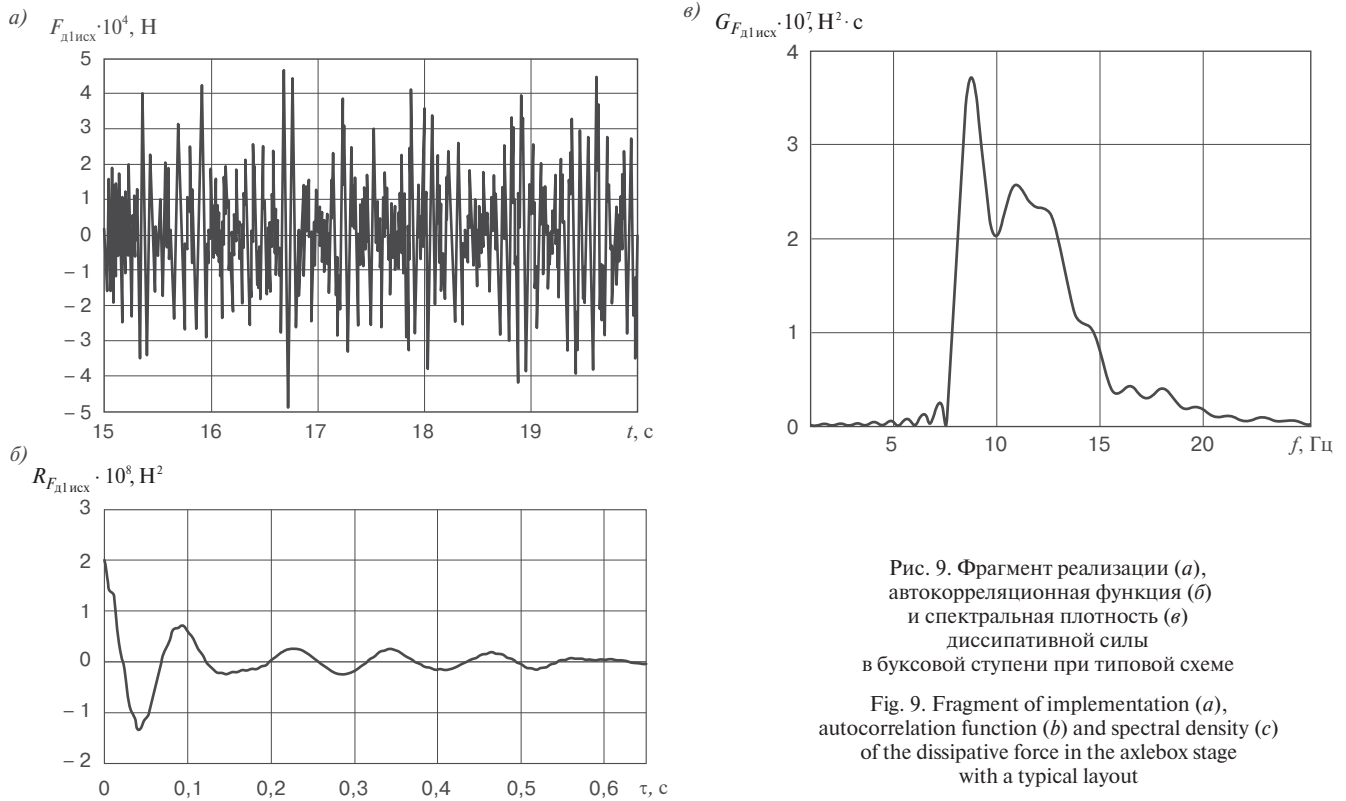


Рис. 9. Фрагмент реализации (а), автокорреляционная функция (б) и спектральная плотность (в) диссипативной силы в буксовой ступени при типовой схеме

Fig. 9. Fragment of implementation (a), autocorrelation function (b) and spectral density (c) of the dissipative force in the axlebox stage with a typical layout

колебаний на числовые характеристики случайных колебаний $z_2(t)$ и силы $F_{\text{длсх}}(t)$, действующие в этом гасителе. Так, например, среднеквадратическое отклонение колебаний $z_2(t)$ снизилось с 0,0013 до 0,0012 м, т. е. на ~7,6 %, а величина абсолютного максимума уменьшилась с 0,0050 до 0,0045 м, т. е. на 10 %, что обеспечит улучшение такого показателя качества, как коэффициент вертикальной динамики в буксовом подвешивании (табл. 2). При этом также значительно изменились характеристики диссипативных сил $F_{\text{дл}}(t)$ в упругозащищенном гасителе (табл. 2):

- среднеквадратическое отклонение S снизилось с ~14 100 до ~1760 Н, т. е. на ~12 %;
- частотный состав колебаний, определяемый эффективной частотой f_e , снизился с ~27,4 до ~14,9 Гц, т. е. на ~46 %;
- среднее значение абсолютного максимума $\bar{H}_a$ уменьшилось от 56 000 до ~6714 Н, т. е. на ~88 %.

Такое существенное снижение $\bar{H}_a$ силы, действующей на элементы гасителя, обеспечит значительное повышение его работоспособности и межремонтных пробегов. Для того чтобы установить численные значения

Таблица 2

Числовые характеристики случайных колебаний показателей динамических качеств механической части

Table 2

Numerical characteristics of random fluctuations in the indicators of the dynamic qualities of the mechanical part

Показатели динамических качеств механической части	Среднеквадратическое отклонение S		Эффективная частота $f_e, \text{ Гц}$		Среднее значение абсолютного максимума $\bar{H}_a$	
	Типовая схема	Схема с УЗБГ	Типовая схема	Схема с УЗБГ	Типовая схема	Схема с УЗБГ
Диссипативная сила в буксовой ступени на 1 колесную пару	$1,4087 \cdot 10^4, \text{ Н}$	$1,7577 \cdot 10^3, \text{ Н}$	27,3837	14,8723	56 000 Н	6713,9 Н
Коэффициент вертикальной динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания	0,0632	0,0374	26,2370	14,8874	0,2512	0,1436

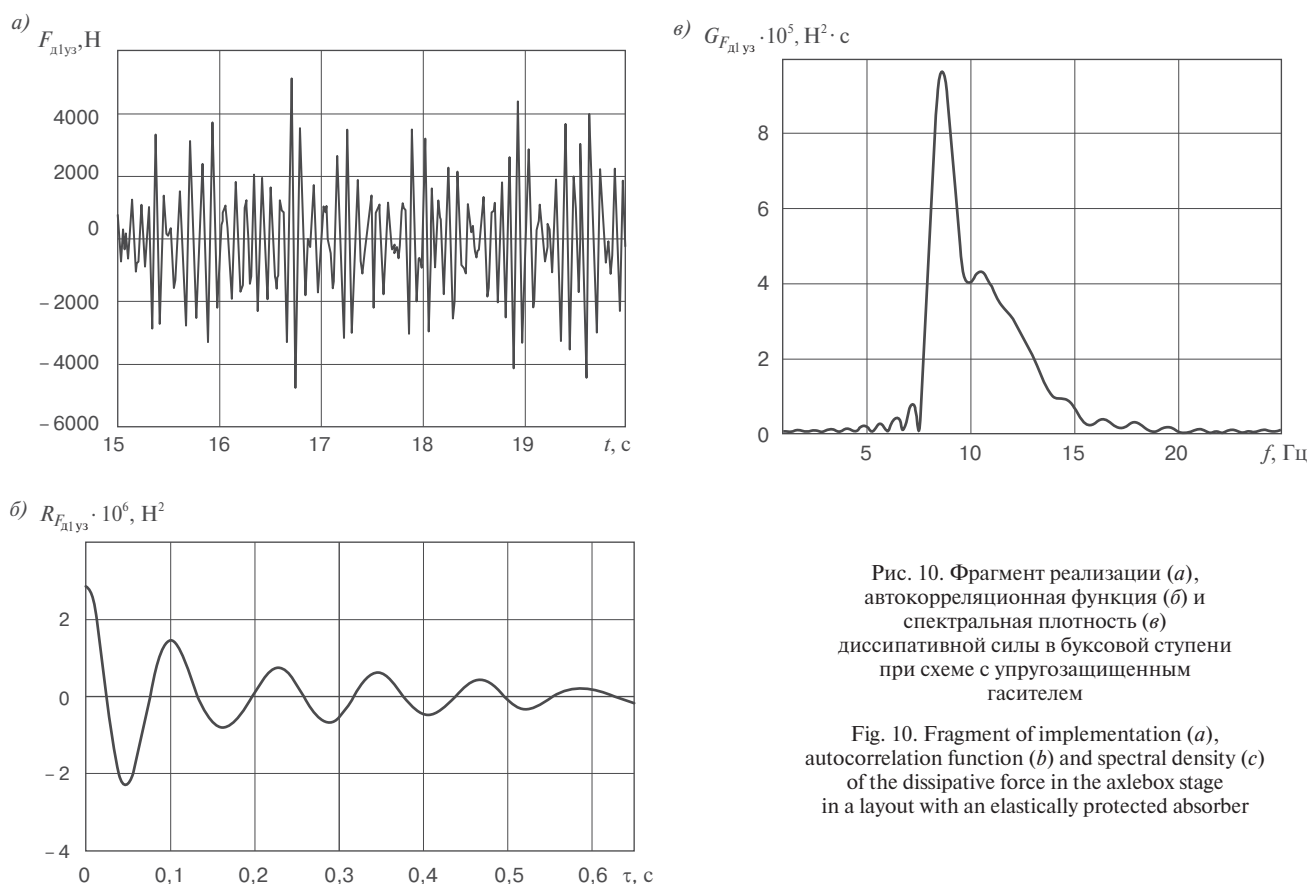


Рис. 10. Фрагмент реализации (а), автокорреляционная функция (б) и спектральная плотность (в) диссипативной силы в буксовой ступени при схеме с упругозащищенным гасителем

Fig. 10. Fragment of implementation (a), autocorrelation function (b) and spectral density (c) of the dissipative force in the axlebox stage in a layout with an elastically protected absorber

этих показателей, следует организовать сравнительную опытную эксплуатацию типовых и упругозащищенных гидравлических гасителей, установленных на одной и той же тележке электровоза.

Для оценки влияния упругозащищенного гидравлического гасителя на показатели качества

функционирования рессорного подвешивания определим коэффициент динамики буксовой ступени рессорного подвешивания $K_{\text{дл}}^{\text{в}}(t)$. Этот коэффициент представляет собой отношение среднего значения абсолютного максимума $\bar{H}_a$ вертикальной динамической силы $F_{\text{д}}(t)$, действующей в рессорном комплексе,

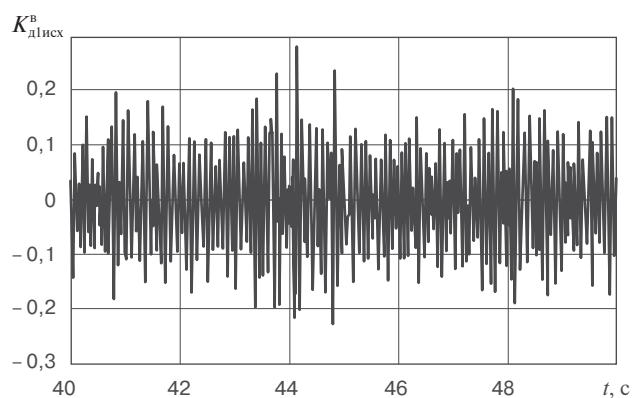


Рис. 11. Фрагмент реализации коэффициента вертикальной динамики буксовой ступени с типовой схемой установки гидравлического гасителя колебаний

Fig. 11. Fragment of implementation of the vertical dynamics coefficient of the axlebox stage with a typical layout for installing a hydraulic vibration damper

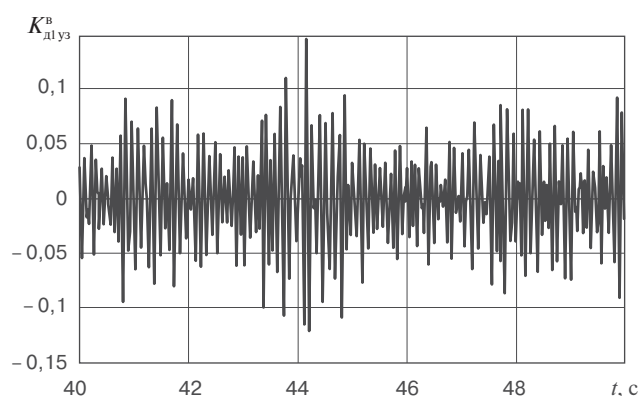


Рис. 12. Фрагмент реализации коэффициента вертикальной динамики буксовой ступени схемы с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний

Fig. 12. Fragment of implementation of the vertical dynamics coefficient of the axlebox stage of the layout with an elastically protected hydraulic vibration damper

к величине статической нагрузки на этот комплект, которая равна 235 кН [1, 10]. Динамическая сила $F_d(t)$ представляет собой сумму упругой $F_y(t)$ и диссипативной $F_{dl}(t)$ сил, возникающих в буксовом подвешивании. На рис. 11 и 12 представлены фрагменты графиков коэффициентов вертикальной динамики, которые показывают, что в варианте с упругозащищенным гасителем колебаний мгновенные значения $K_{длвз}^b(t)$ уменьшились практически в два раза и не превышают значения $K_{длвз}^b(t) = 0,15$. При этом для обоих вариантов установки гидравлического гасителя допустимое по нормам для грузовых электровазов [10] значение $[K_{дл}^b(t)] = 0,35$ не достигается.

Числовые характеристики случайных процессов $K_{дл}^b(t)$ в первой ступени рессорного подвешивания тележки, приведенные в табл. 2, показывают следующее:

- среднеквадратическое отклонение S снизилось с $\sim 0,063$ до $\sim 0,037$, т. е. на $\sim 38\%$;
- частотный состав колебаний, определяемый эффективной частотой f_e , снизился с $\sim 26,2$ до $\sim 14,9$ Гц, т. е. на $\sim 43\%$;

- среднее значение абсолютного максимума $\bar{H}_a(K_{дл}^b)$ уменьшилось от $\sim 0,25$ до $\sim 0,14$, т. е. на $\sim 44\%$.

Анализ графика случайного процесса $K_{длвз}^b(t)$ (рис. 12) показывает, что в момент времени $t_1 = 44,1$ с мгновенное значение абсолютного максимума $\bar{H}_a(t_1)$ превышает среднее значение, что вполне естественно для случайного процесса.

Обсуждение и заключение. Для оценки эффективности применения в буксовом подвешивании упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний проведено сравнительное исследование колебаний упрощенной модели электроваза 2ЭС5К с типовой схемой буксовой ступени рессорного подвешивания и схемой с упругозащищенным гидравлическим гасителем колебаний. В результате проведенного исследования были получены числовые характеристики случайных колебаний узлов ходовой части локомотива, анализ которых позволяет сделать следующие выводы о том, что применение упругозащищенного буксового гасителя колебаний:

1. Существенно (почти в два раза) снижает частотный диапазон сил, возникающих в таком гасителе, и уменьшает величину среднего значения абсолютного максимума сил, действующих в гасителе, более чем в восемь раз, что обеспечивает повышение безотказности гасителя и, как следствие, увеличение его межремонтных пробегов.
2. Улучшает такой показатель динамических качеств, как коэффициент вертикальной динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания, уменьшая среднее значение абсолютного максимума этого коэффициента с 0,25 до 0,14.
3. Практически не оказывает влияния на колебания тележки, а также на угловые колебания тягового

электродвигателя и крутильные колебания в тяговой передаче.

Для определения межремонтного пробега упругозащищенного гидравлического гасителя следует провести подконтрольную эксплуатацию или испытания опытного образца буксового узла с упругозащищенным гасителем колебаний и уточнить значения параметров такого узла.

Полученные рекомендации могут быть реализованы и на локомотивах других типов, для чего следует уточнить необходимые значения коэффициента затухания гидравлического гасителя колебаний и последовательно включенной с ним пружины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Механическая часть тягового подвижного состава: учеб. / И. В. Бирюков [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 440 с.
2. Savoskin A. N. Selection of springs and vibration dampers connection diagram in railway vehicles spring suspension // *Sciences of Europe*. 2019. No. 13. P. 61–66.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы: норматив. произв.-практ. изд. М.: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
4. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги: учеб. / под ред. С. И. Осипова. М.: Маршрут, 2006. 436 с.
5. Голубенко А. Л. Сцепление колеса с рельсом: монография. Киев: Випол, 1993. 448 с.
6. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях в проектировании пассажирских и грузовых вагонов: руководящий документ по отрасли: РД 32.68-96: утв. МПС РФ от 6 января 1997 г. № А-11у. М., 1997.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1958. 464 с.
8. Hamdi R. T. A., Abdul-Hussein M. A. Using Matlab—Simulink for Solving Differential Equations // *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018. Vol. 5, No. 5. P. 307–314.
9. Hroncová D., Šarga P., Gmíterko A. Simulation of Mechanical System with Two Degrees of Freedom with Bond Graphs and MATLAB/Simulink // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 48. P. 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.508>.
10. ГОСТ Р 55513—2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 45 с.

REFERENCES

1. Biryukov I. V., Savos'kin A. N., Burchak G. P., et al. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava: ucheb.* [Mechanical part of traction rolling stock: textbook]. Moscow: Transport Publ.; 1992. 440 p. (In Russ.).
2. Savoskin A. N. Selection of springs and vibration dampers connection diagram in railway vehicles spring suspension. *Sciences of Europe*. 2019;(13):61–66.
3. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules for traction calculations for train operation]. Moscow: JSC Russian Railways Publ.; 2016. 515 p. (In Russ.).
4. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow: Marshrut Publ.; 2006. 436 p. (In Russ.).
5. Golubenko A. L. *Stseplenie kolea s rel'som* [Wheel to rail adhesion]. Kiev: Vipol Publ.; 1993. 448 p. (In Russ.).
6. *Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispol'zovaniya pri issledovaniyakh v proektirovaniy passazhirskikh i gruzovykh vagonov: rukovodyashchiy dokument po otrasli: RD 32.68-96* [Design irregularities of the railway track for use in research in the design

of passenger and freight cars: guidance document for the industry: RD 32.68-96]. Approved by Railway Ministry of RF in January 6, 1997 No. A-11u. Moscow; 1997. (In Russ.).

7. Venttsel' E. S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1958. 464 p. (In Russ.).

8. Hamdi R. T. A., Abdul-Hussein M. A. Using Matlab—Simulink for Solving Differential Equations. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018;5(5):307-314.

9. Hroncová D., Šarga P., Gmitterko A. Simulation of Mechanical System with Two Degrees of Freedom with Bond Graphs and MATLAB/Simulink. *Procedia Engineering*. 2012;(48):223-232. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.508>.

10. GOST R 55513—2013. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities]. Nat. standard of the Russian Federation: introduction date 2014-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. 45 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН,
д-р техн. наук, профессор, Российский университет
транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва,
ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 528727,
<https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

Наталья Сергеевна ЛАВЛИНСКАЯ,
аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
<https://orcid.org/0000-0003-0937-3906>

Павел Юрьевич ИВАНОВ,
канд. техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет
путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского,
д. 15), Author ID: 776494, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOS'KIN,
Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Russian University of Transport
(127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obratsova St.), Author ID: 528727,
<https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

Nataliya S. LAVLINSKAYA,
Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Moscow,
9, bldg. 9, Obratsova St.), <https://orcid.org/0000-0003-0937-3906>

Pavel Yu. IVANOV,
Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Irkutsk State
Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.),
Author ID: 776494, <https://orcid.org/0000-0001-6836-5928>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН. Общее руководство проведенным исследованием, разработка схемы установки гасителя и кинематических схем колебаний, разработка математической модели, выбор методологии расчета и оценки эффективности предложенной схемы (40%).

Наталья Сергеевна ЛАВЛИНСКАЯ. Разработка математической модели, выполнение расчетов в программном пакете Matlab—Simulink, оформление рисунков и графиков (40%).

Павел Юрьевич ИВАНОВ. Сбор и расчет исходных данных локомотива для моделирования, сбор статистики отказа гасителей (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOS'KIN. General management of the research, development of the damper installation layout and kinematic oscillation schemes, development of the mathematical model, choice of methodology for calculating and evaluating the effectiveness of the proposed layout (40%).

Nataliya S. LAVLINSKAYA. Development of the mathematical model, performing calculations in the Matlab—Simulink software package, designing drawings and graphs (40%).

Pavel Yu. IVANOV. Collection and calculation of initial locomotive data for simulation, collection of absorber failure statistics (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 01.04.2022, первая рецензия получена 12.04.2022, вторая рецензия получена 21.04.2022, принята к публикации 23.05.2022.

The article was submitted 01.04.2022, first review received 12.04.2022, second review received 21.04.2022, accepted for publication 23.05.2022.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А. В. Комиссарова. — 2-е изд. — Москва: РАС, 2019. — 68 с.

В книге рассмотрены бизнес-процессы пассажирских перевозок с использованием автоматизированной системы управления пассажирскими перевозками «Экспресс-3».

Во втором издании актуализированы и расширены описания текущего состояния информационных технологий системы «Экспресс-3», книга стала более удобной для чтения.

Издание предназначено для руководителей и инженерно-технического состава пассажирского комплекса; специалистов, связанных с разработкой и внедрением информационных технологий на российских железных дорогах; научных работников, преподавателей и студентов транспортных вузов.

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: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 629.423.1:629.423.31

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156

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



ПООСНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯГИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Н. Д. Шилин✉, С. Н. Прокофьев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение тяговых и сцепных свойств грузовых электровозов в настоящее время является актуальным вопросом для отечественного локомотивостроения. Рост массы и скорости движения поездов вынуждает искать новые пути и возможности реализации предельной силы тяги грузовых электровозов для соответствия требованиям быстроразвивающегося перевозочного процесса.

Материалы и методы. Проведен анализ существующих теоретических и практических методов управления сцеплением, а также выполнена разработка алгоритма управления сцеплением колесных пар электровоза с асинхронными тяговыми двигателями.

Результаты. На основе проведенного анализа результатов испытаний реального электровоза была разработана математическая модель движения электровоза, включающая в себя алгоритмы поосного управления силой тяги, в том числе с учетом перераспределения силы тяги между осями. Были проведены расчеты математической модели движения электровоза с поездом на участке с работающим и неработающим алгоритмом перераспределения, а также с различными настройками этого алгоритма. В модели также учтены изменение коэффициента сцепления колес с рельсами в зависимости от номера колесной пары по ходу движения, а также догружающие и разгружающие силы, возникающие в экипажной части в зависимости от реализуемой силы тяги. В результате расчетов были получены данные, имеющие хорошую сходимость с данными испытаний реального электровоза.

Обсуждение и заключение. Разработанная математическая модель позволяет оценить реализацию силы тяги электровоза, максимально приближенную к заданной контроллером машиниста, в условиях меняющегося коэффициента сцепления и его неоднородности под разными колесными парами электровоза. Полученные результаты в дальнейшем возможно применять при разработке перспективных грузовых электровозов с асинхронными тяговыми двигателями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, асинхронный тяговый двигатель, коэффициент сцепления, проскальзывание, сила сцепления, система колесо—рельс, сила тяги

Для цитирования: Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Разработка алгоритмов повышения тяговых и сцепных свойств электровозов с асинхронными тяговыми двигателями // 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>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1:629.423.31

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156

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



REDISTRIBUTION OF TRACTIVE FORCE PER AXLE FOR ELECTRIC LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS

Nikita D. Shilin✉, Sergey N. Prokof'ev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Improving the traction and adhesion properties of freight electric locomotives is currently an urgent issue for the domestic locomotive industry. The increase in the mass and speed of trains enables to seek new ways and possibilities for realising the maximum tractive force of freight locomotives in order to meet the requirements of the rapidly developing transportation methods.

Materials and methods. The authors carries out the analysis of existing theoretical and practical methods of adhesion control and developed the algorithm for controlling the wheelsets adhesion of a locomotive with asynchronous traction motors.

Results. The authors concerning the tests analysis of a real electric locomotive, developed a mathematical model of the locomotive movement, which included algorithms for axial control of the tractive force with the redistribution of the tractive force between the axles. Calculations of a mathematical model of the movement of a locomotive with a train on a section with the redistribution algorithm both enabled and disabled, as well as with various settings of this algorithm, were carried out. The model also took into account the change in the adhesion coefficient of the wheels with the rails depending on the numerical order of a wheelset in the direction of travel, as well as the additional loading and unloading forces that arise in the undercarriage depending on the tractive force being realised. As a result of the calculations, obtained data showed good convergence with the test data of a real electric locomotive.

Discussion and conclusion. The developed mathematical model allows evaluating the realisation of the tractive force of a locomotive as close as possible to that specified by the locomotive throttle under conditions of a changing adhesion coefficient and its heterogeneity under different wheelsets of the locomotive. The obtained results can be further applied in the development of promising freight electric locomotives with asynchronous traction motors.

KEYWORDS: electric locomotive, asynchronous traction motor, adhesion coefficient, wheel sliding, adhesion force, wheel – rail system, tractive force

For citation: Shilin N. D., Prokof'ev S. N. Redistribution of tractive force per axle for electric locomotives with asynchronous traction motors. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):148-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-148-156>.

Введение. Более 90 % парка электровозов российских железных дорог составляют электровозы с коллекторными тяговыми двигателями (ТД) постоянного тока. В настоящее время промышленностью все шире осваивается выпуск современной силовой полупроводниковой техники, электровозов с отечественными асинхронными тяговыми приводами.

Несмотря на то что по стоимости производства электровозы с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) дороже, чем электровозы с коллекторными ТД, они значительно эффективнее последних, особенно при вождении поездов повышенной массы. В настоящее время для внедряемых новых электровозов с АТД весовые нормы грузовых поездов увеличивают. Как показывает практика эксплуатации, при одинаковых условиях сцепления колес с рельсами (равная сила нажатия колеса на рельс, схожие условия сцепления) восьмиосные электровозы с АТД заменяют двенадцатиосные электровозы с коллекторными ТД. То же справедливо и для двенадцатиосных электровозов с АТД в трех секциях, которые приходят на смену электровозам с коллекторными ТД, имеющими шестнадцать ведущих осей в четырех секциях (сдвоенные электровозы).

Как следствие, повышение массы грузовых поездов ведет к реализации касательной силы тяги F_k на колесах электровоза на границе или даже выше потенциальной силы сцепления $F_{сц}$ колес с рельсами. Своевременное распознавание избыточного проскальзывания колесных пар (КП) и борьба с развитием их боксования является важнейшим показателем работоспособности тягового привода электровоза при реализации тяговых свойств на пределе по сцеплению.

Ограничение скорости скольжения колес КП или полное предотвращение боксования достигается снижением силы тяги F_k до величины меньшей или равной силе сцепления $F_{сц}$. Разность этих сил $\Delta F = F_{сц} - F_k$ определяет угловое ускорение или замедление КП при возникновении боксования. Однако снижение F_k на ободе колеса у любой КП приводит к снижению результирующей силы тяги всего электровоза. Продолжительность уменьшения F_k зависит от длины участка рельсового пути с неблагоприятными условиями сцепления: если на этом участке происходит кратковременное единичное снижение F_k , то потеря силы тяги электровоза будет незаметна и не скажется на уменьшении средней скорости движения поезда. В то же время на участке рельсового пути большой протяженности проскальзывания КП уже значительно повлияют на среднюю скорость движения. Такой процесс становится критичным на подъеме, когда при неблагоприятных условиях сцепления проскальзывания КП происходят особенно часто.

Система защиты от избыточного проскальзывания КП встроена в систему защиты от боксования электровоза. Алгоритмы такой системы должны постоянно контролировать информацию о сцепных свойствах каждой КП, скоростей вращения КП и стремиться минимизировать потерю результирующей силы тяги электровоза на автосцепке. Если на одной или ряде КП величина сцепления не превышает установленных значений, то система должна перенести на эти КП часть тягового усилия, которая теряется в результате избыточного проскальзывания других КП. В первую очередь увеличение силы тяги должно возлагаться на те колесно-моторные блоки (КМБ), у которых существует наибольший запас между реализованной касательной силой тяги и потенциальной силой сцепления.

Обзор исследований. Существует множество теоретических и практических исследований (как отечественных, так и зарубежных) на тему повышения сцепных свойств электровозов [1–4]. Помимо традиционной подсыпки кварцевого песка под колеса электровозов внедряются и другие системы управления скольжением КП, позволяющие регулировать силу тяги колес с обеспечением реализации касательной силы тяги на пределе по сцеплению [5–10]. Основной принцип работы этих систем основан на управлении скоростью проскальзывания КП при возникновении боксований при различных условиях сцепления колеса с рельсом. В результате регулирования скорости проскальзывания КП результирующая сила тяги электровоза будет ограничена условиями естественного сцепления, которое возможно увеличить, используя предупредительную подачу кварцевого песка под колеса. Для повышения сцепных свойств перед использованием песка также можно перераспределить силу тяги между осями электровоза.

Наиболее эффективная защита от боксования КП была реализована на опытных электровозах 2ЭВ120 (магистральный двухсекционный грузовой электровоз двойного питания, разработан совместно ООО «ПЛК» и Bombardier Inc.). При проведении испытаний в опытной эксплуатации на участках Туапсе—Тихорецкая Северо-Кавказской железной дороги и Челябинск—Магнитогорск Южно-Уральской железной дороги специалистами АО «ВНИИЖТ» было установлено, что необходимость в экипировке электровоза песком сократилась до одного раза в месяц, что значительно реже по сравнению с регулярно эксплуатируемыми электровозами на этих участках. На рис. 1 представлена осциллограмма сил тяги четырех КП, зафиксированных в одной из опытных поездов по Южно-Уральской железной дороге.

Сила тяги каждой оси регулируется индивидуально с учетом общей заданной силы тяги и потенциальной силы сцепления каждой оси (рис. 1). О реализации

предельно допустимого коэффициента сцепления электровозом указывают сигналы признака боксования КП электровоза (поз. 6). На участке пути с 22 по 22,5 км система управления (СУ) приводом снизила силу тяги первой оси для предотвращения ее глубокого боксования, однако для поддержания общей реализуемой силы тяги электровоза близко к заданной разность между ними для первой оси была равномерно перераспределена между соседними осями (КП 2–4), имеющими более высокий запас по сцеплению. Повышенный запас по сцеплению данных осей объясняется лучшими условиями сцепления колес с рельсами, а также наличием догружающего момента тележек и кузова при реализации силы тяги ТД электровоза. Максимальное повышение силы тяги $F_{к1}$ выше заданной силы $F_{зд}$ при перераспределении сил составило 7 % для КП 3 и 4.

Тяговый привод электровоза 2ЭВ120 и его СУ были разработаны компанией Bombardier Inc. Алгоритмы управления силой тяги ТД упомянутого электровоза неизвестны, поэтому авторы выполнили собственные исследования, цель которых определить, насколько поосное перераспределение силы тяги между КМБ даст прирост силы тяги электровоза. Для проведения исследований была разработана математическая модель тягового привода для одной четырехосной секции электровоза с АТД с алгоритмами защиты от боксования. Разработанная математическая модель явилась основой для проведения теоретических исследований с оценкой эффективности от использования поосного компенсирующего перераспределения силы тяги между КМБ на тяговые свойства электровоза с последующими рекомендациями применения алгоритмов на перспективных отечественных электровозах с АТД.

Математическая модель тягового привода электровоза позволила оценить результаты работы противобоксовочной защиты с разными параметрами системы на одном мерном участке пути. Математическая модель включила в себя уравнения движения односекционного электровоза с грузовым составом, касательную силу тяги и потенциальную силу сцепления каждой КП с рельсами, формируемую на основе закона нормального распределения с заданными начальными значениями потенциального сцепления. Также в математической модели использованы законы взаимодействия колес с рельсами, в том числе и при появлении проскальзываний [1, 2, 3, 6, 7, 10, 11], учтены моменты инерции вращающихся частей КМБ. Управление проскальзыванием колес возложено на регуляторы поосного задания силы тяги, значения которых и определяют результирующую касательную силу тяги каждого колеса.

Так как коэффициент сцепления является случайной величиной и зависит от многих внешних факто-

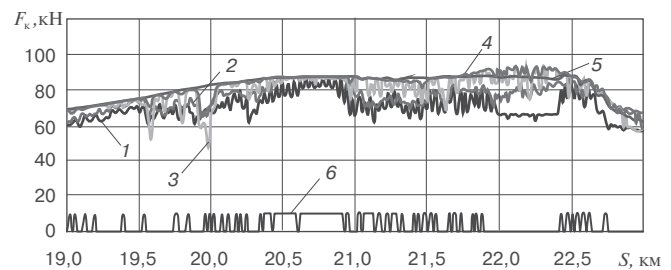


Рис. 1. Осциллограмма боксования секции Б электровоза 2ЭВ120: 1–4 — силы тяги $F_{кi}$ КП 1–4 электровоза соответственно; 5 — заданная сила тяги электровоза, приведенная к одному двигателю $F_{зд}$; 6 — сигнал наличия боксования

Fig. 1. Slippage oscillogram of section B of the 2EV120 electric locomotive: 1–4 — tractive force $F_{кi}$ of wheelsets 1–4 of the electric locomotive, respectively; 5 — given tractive force of the electric locomotive, reduced to one $F_{зд}$ motor; 6 — wheelspin alarm

ров, то было принято, что он задан как некая переменная величина относительно опорного значения с последующим усреднением фильтром первого порядка. Такое моделирование с использованием фильтра позволило формировать сглаженные процессы изменения коэффициента сцепления и в любой момент времени задавать его принудительное снижение, изменяя начальное значение, тем самым имитируя погодные условия на участке расчета. В общем виде формула задания коэффициента сцепления имеет вид

$$\psi_{сц} = \psi_{сц0} + 0,2(rand - 0,5), \quad (1)$$

где $\psi_{сц0}$ — начальное значение коэффициента сцепления; $rand$ — случайное генерируемое значение от 0 до 1.

Согласно [2, 3] коэффициент сцепления каждой КП задается разными значениями и постепенно увеличивается от одной КП к другой по ходу движения электровоза по одному участку рельсового полотна. Это связано с очищением поверхности рельса от влаги и загрязнений первыми КП за счет вертикального давления колес на рельсы и проскальзываний. Для учета данного процесса при моделировании были введены дополнительные коэффициенты: понижающий коэффициент сцепления первой оси на 10 % относительно исходного значения и повышающие коэффициенты для третьей и четвертой осей на 10 и 20 % соответственно [12].

Результаты и обсуждения. Для перераспределения моментов между ТД авторами предложен следующий алгоритм:

- при возникновении проскальзывания и фиксации системой защиты избыточной скорости скольжения в секции электровоза определяются номера тех КП, которые не подвергнуты боксованию и имеют запас по сцеплению. Определение боксующей КП осуществляется методом сравнения линейной скорости электровоза $v_{лин}$ со скоростью вращения каждой КП $v_{кПi}$, в случае

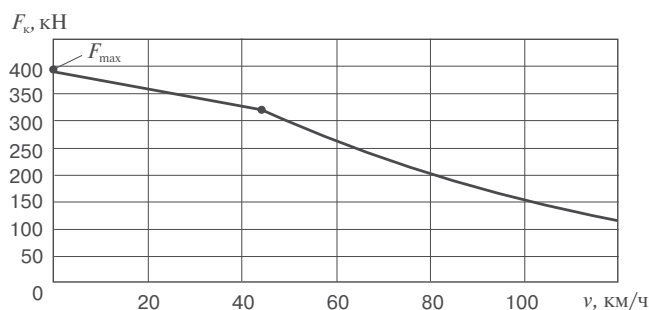


Рис. 2. Заданная тяговая характеристика секции электроваза

Fig. 2. Given traction feature of the electric locomotive section

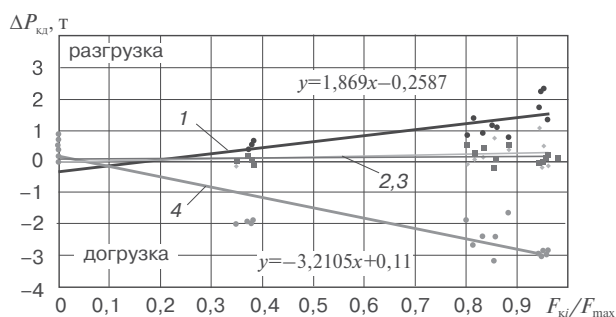


Рис. 3. Зависимости динамической составляющей силы нажатия КП на рельс ΔP_{kd} при реализации КМБ касательной силы тяги: 1–4 — КП 1–4 соответственно

Fig. 3. Dependences of the dynamic component of the wheelset pressing force on the rail ΔP_{kd} when the wheel-motor unit realises the tangential tractive force: 1–4 — wheelsets 1–4 respectively

превышения минимального порога по скольжению система определяет наличие боксования у данной КП;

- запас по сцеплению каждой КП определяется частотой срывов в критический режим проскальзывания данной КП: чем больше срывов, тем меньше запас по сцеплению и, как следствие, возможность получения дополнительной догрузки;

- если суммарная реализуемая сила тяги электроваза $F_{\text{сум}}$ ниже установленной контроллером машиниста заданной силы $F_{\text{кн}}$ на 7%, то система формирует сигнал на разрешение применения алгоритма перераспределения силы тяги между КМБ;

- плавное пропорциональное повышение тягового момента каждого из небуксующих двигателей происходит до тех пор, пока суммарная реализуемая сила тяги всеми КМБ $F_{\text{сум}}$ не достигнет значений, близких к значениям $F_{\text{кн}}$;

- повышение заданной силы для каждой оси, вращающейся без проскальзывания, происходит ступенчато, с шагом 10 кН/с. Выбор значения, являющегося

пределом превышения заданной силы на каждую ось, рассмотрен ниже.

При возникновении избыточного проскальзывания КП отключалась от перераспределения с последующим подключением блока регулирования скорости скольжения, а неиспользованная сила тяги перераспределялась между другими КМБ.

Для проверки работоспособности разработанной математической модели и алгоритмов перераспределения проведены сравнительные расчеты движения секции электроваза по участку пути с включенной и отключенной системой перераспределения силы тяги. Масса состава, начальная координата расчета и профиль пути во всех расчетах были одинаковыми. Закон изменения начального значения коэффициента сцепления колес с рельсами для каждой оси тоже во всех вариантах расчета был одинаков и задавался на 0,5% больше, чем сила тяги, приходящаяся на один КМБ. Случайная величина изменения коэффициента сцепления задавалась ранее просчитанным массивом значений по формуле (1), циклически повторяющимся в зависимости от длины пройденного пути. Движение электроваза осуществлялось в режиме тяги по тяговой характеристике, представленной для одной секции электроваза на рис. 2, в течение всего времени расчета $T = 1000$ с.

Для учета динамического перераспределения сил $P_{\text{дин}}$ между КП экипажа при реализации силы тяги в математическую модель добавлен расчет вертикальной нагрузки каждой оси на рельс с учетом догружающих и разгружающих сил в зависимости от реализуемой КМБ силы тяги. В расчете значения $P_{\text{дин}}$ выбраны согласно экспериментально полученным данным электроваза 2ЭС6 с измерением дополнительной составляющей разгружающих и догружающих сил нажатия КП на рельс ΔP_{kd} при движении вперед кабиной управления. На рис. 3 приведены зависимости динамической составляющей силы нажатия колесной пары на рельс ΔP_{kd} от действия относительной силы тяги F_{ki}/F_{max} четырех осей (где F_{ki} — реализуемая сила тяги оси, кН; F_{max} — максимальная сила тяги электроваза, приведенная к одной оси, кН) согласно формуле (2).

Расчетная сила нажатия КП на рельс определена по формуле

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{ст}} + \Delta P_{kd}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ст}}$ — статическое нажатие КП на рельс, кН.

На основе результатов расчетов, выполненных с помощью математического моделирования, осуществлялся качественный анализ работы алгоритмов перераспределения с различными настройками чувствительности системы перераспределения.

Результаты моделирования с отключенным алгоритмом перераспределения представлены на рис. 4 и 5.

На протяжении расчета (рис. 4) электровоз двигался в тяге с постоянным проскальзыванием КП 1. Это объясняется тем, что в расчете специально созданы условия реализации силы тяги на пределе по сцеплению. Поэтому первая ось имела сниженные сцепные свойства и не реализовывала заданную контроллером силу тяги, приходящуюся на один КМБ. Скорость проскальзывания первой оси в среднем составила около 3 %. КП 2 двигалась с периодическими проскальзываниями, так как согласно начальным условиям расчета ее сила тяги была равна средней величине силы сцепления. КП 3 и 4 двигались практически без проскальзываний с реализацией контроллером заданной силы тяги $F_{кн}$. В момент времени с 650 по 670 с (рис. 4, а) коэффициент сцепления всех колес принудительно снижался на 20 % для моделирования наезда на масляное пятно и введения всех КП в боксование, тем самым снижая реализуемую силу тяги $F_{к1-4}$.

Проскальзывания КП 1 и 2 ограничивались алгоритмом работы математической модели и регулятора скорости проскальзывания КП на уровне 3 % от линейной скорости движения (рис. 4, б). (В данной статье алгоритм работы регулятора подробно не рассматривается.)

В рассмотренном режиме движения получен набор реализуемой силы тяги $F_{сум}$ до заданной контроллером силы тяги $F_{кн}$, так как $F_{сум}$ является суммой сил $F_{кi}$. Эти силы показаны на рис. 5, где видна разница между ними примерно в 3–4 %. Таким образом, у электровоза с защитой от боксования и юза без функции перераспределения силы тяги между осями есть определенный риск недоиспользования сцепных свойств, особенно на руководящих подъемах, что приводит к уменьшению перегонной скорости движения поезда.

Далее были проведены расчеты движения электровоза по тому же участку пути с такими же условиями сцепления с включенным алгоритмом перераспределения силы тяги между осями. Эффект от перераспределения силы тяги между осями зависит от верхней границы, до которой СУ разрешено увеличивать заданную силу тяги на ось, у которой отсутствует проскальзывание. На рис. 6 представлены результаты расчета сил тяги четырех КМБ и линейных скоростей КП в зависимости от времени при включенном алгоритме перераспределения с разрешенным превышением силы тяги двигателя до 7 % относительно заданной контроллером силы тяги, приведенной к одной оси.

При включенном алгоритме перераспределения дополнительное задание силы тяги получали КП 3 и 4 (рис. 6). Лучшие условия по сцеплению с рельсами позволили реализовать этим КП дополнительную

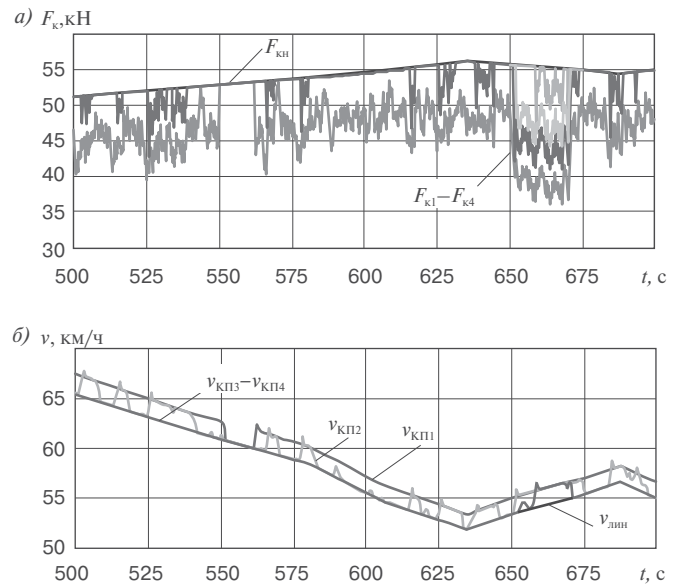


Рис. 4. Осциллограммы сил тяги $F_{кi}$ четырех осей без перераспределения и приведенной заданной силы тяги $F_{кн}$ (а), а также линейных скоростей вращения КП 1–4 электровоза $v_{кпi}$ и линейной скорости электровоза $v_{лин}$ (б)

Fig. 4. Oscillograms of tractive forces $F_{кi}$ of four axes without redistribution and the reduced given force $F_{кн}$ (а), as well as the linear spin rates of wheelsets 1–4 of the electric locomotive $v_{кпi}$ and linear speed of the electric locomotive $v_{лин}$ (б)

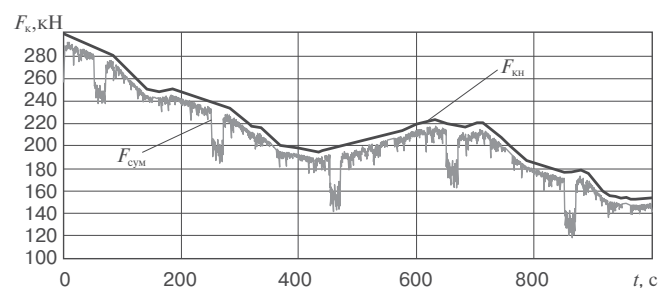


Рис. 5. Осциллограммы суммарной реализуемой $F_{сум}$ и заданной $F_{кн}$ контроллером машиниста силы тяги на секцию электровоза

Fig. 5. Oscillograms of the total realised $F_{сум}$ tractive force and $F_{кн}$ tractive force given by the locomotive throttle on the electric locomotive section

силу тяги. При этом третья и четвертая ось уже большую часть времени прошли с проскальзыванием на границе по сцеплению.

За счет работы алгоритмов регуляторов моментов АТД, примененных в математической модели, как при включенном, так и отключенном алгоритме перераспределения максимальное значение скорости скольжения находилось в диапазоне от 3 до 3,4 км/ч для всех КП вне зависимости от глубины перераспределения.

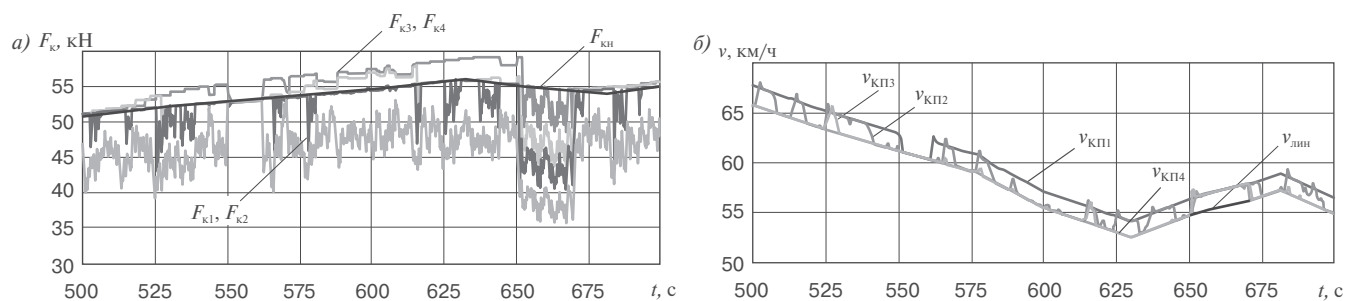


Рис. 6. Осциллограммы сил тяги F_{ki} четырех осей с учетом перераспределения до 7 % и приведенной заданной силы F_{kn} (а), а также линейных скоростей вращения КП 1–4 электровоза $v_{kпi}$ и линейной скорости электровоза $v_{лин}$ (б)

Fig. 6. Oscillograms of the F_{ki} tractive forces of four axes, considering the redistribution up to 7 % and the F_{kn} reduced given force (а), as well as the $v_{kпi}$ linear spin rates of wheelsets 1–4 of the electric locomotive and the $v_{лин}$ linear speed of the electric locomotive (б)

На рис. 7 показаны осциллограммы заданной и реализуемой силы тяги секции электровоза с включенным перераспределением между осями. При

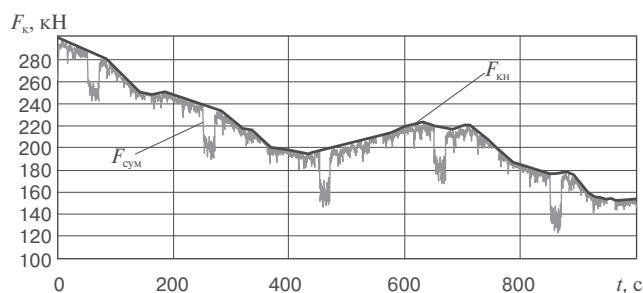


Рис. 7. Осциллограммы суммарной реализуемой $F_{сум}$ и заданной $F_{кн}$ контроллером машиниста силы тяги на секцию электровоза с включенным перераспределением между осями

Fig. 7. Oscillograms of the $F_{сум}$ total realised tractive force and $F_{кн}$ tractive force given by the locomotive throttle on the section of the electric locomotive with the redistribution between the axes

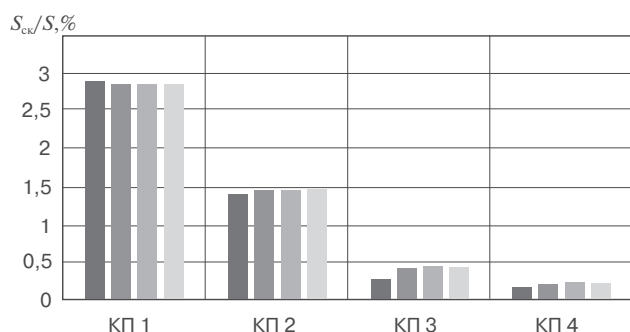


Рис. 8. Диаграмма пути, пройденного КП 1–4 в проскальзывании, приведенного к общему пройденному пути:

■ — без перераспределения; ■ — с перераспределением (5 %); ■ — с перераспределением (7 %); ■ — с перераспределением (10 %)

Fig. 8. Diagram of the distance traveled by wheelsets 1–4 during wheel sliding, reduced to the total distance traveled: ■ — without redistribution; ■ — with redistribution (5 %); ■ — with redistribution (7 %); ■ — with redistribution (10 %)

сравнении с рис. 5 можно увидеть, что результат моделирования с перераспределением силы тяги позволил приблизить реализуемую силу к заданной контроллером силе тяги с разностью примерно в 1–1,5 %.

Применение алгоритма перераспределения силы тяги между осями с повышением силы тяги осей до 7 % увеличило на участке пройденный путь и среднюю скорость движения секции электровоза с грузовым составом на 1,36 % по сравнению с движением такого же поезда при прочих одинаковых условиях, но без применения алгоритма перераспределения. Так, во втором случае пройденный путь увеличился с 15,718 до 15,936 км, а средняя скорость движения с 56,6 до 57,38 км/ч.

Дополнительно с помощью математической модели проведены расчеты при движении электровоза с допустимым порогом повышения сил тяги осей на 5, 7 и 10 % свыше заданной силы тяги $F_{кн}$ (ΔF_{var}). Результаты расчетов представлены в таблице. (ΔF_{var} — значение превышения $F_{кн}$.)

Как показали расчеты, увеличение порога изменения силы тяги незначительно, но сказывается на эффективности пропускной способности движения поездов. Для более качественного сравнения результатов расчетов построены диаграммы параметров движения каждой КП (рис. 8).

Различные алгоритмы перераспределения мало влияют на те оси, которые находятся в постоянном проскальзывании, например КП 1 (рис. 8), вследствие чего КП 1 имеет такой же путь относительного проскальзывания $S_{ск}/S$ (где $S_{ск}$ — путь, пройденный КП в скольжении, м; S — общий путь, пройденный КП при расчетах, м), как при отключенном алгоритме перераспределения. Для КП 2–4 при работе алгоритма перераспределения отмечено некоторое увеличение пройденного пути, в том числе за счет проскальзывания. Это объясняется тем, что при применении алгоритма

Таблица

Эффективность применения алгоритма перераспределения
с различным порогом повышения силы тяги осей

Table

Efficiency of applying the redistribution algorithm
with different threshold for increasing the tractive force of the axles

Показатель расчета	$\Delta F_{\text{var}} \leq 5\%$	$\Delta F_{\text{var}} \leq 7\%$	$\Delta F_{\text{var}} \leq 10\%$
Увеличение пройденного пути относительно движения с отключенным перераспреде- лением, %	1,26	1,36	1,48
Увеличение средней скорости относительно движения с отключенным перераспреде- лением, %	1,26	1,36	1,48
Увеличение реализуемой силы тяги секции электровоза на участке относительно движе- ния с отключенным перерас- пределением, %	1,28	1,37	1,45

перераспределения повышается риск появления боксования на осях, которые получают повышенное задание силы тяги, вследствие чего увеличивается и время нахождения этих КП в проскальзывании.

Проведенный анализ показывает, что применение алгоритма перераспределения силы тяги между осями повышает тяговые свойства электровоза, увеличивая перегонную скорость поезда на участках. При этом чем больше допустимый порог перераспределения силы тяги между осями, не имеющими проскальзывания, тем больше повышаются тяговые свойства электровоза. Путь и время нахождения КП в проскальзывании также может увеличиваться, но незначительно (при поддержании скорости скольжения на одинаковом уровне).

Заключение. Разработанные алгоритм управления сцеплением КП и математическая модель взаимодействия силы тяги КМБ и силы сцепления в контакте колеса с рельсом позволили оценить тяговые способности односекционного электровоза в режиме работы на пределе по сцеплению, в том числе каждой оси отдельно с учетом использования алгоритма перераспределения силы тяги между КП.

Расчеты моделирования показали, что наиболее эффективный алгоритм перераспределения силы тяги должен включать в себя возможность перераспределения силы тяги с превышением выше заданной контроллером силы тяги, приведенной к одной оси, с порогом до 10 %. Повышение порога перераспределения

сил тяги не приведет к значительному увеличению средней скорости и силы тяги электровоза при боксовании, однако может привести к частым срывам в боксовании небуксующих КП, что, в свою очередь, может привести к повышенному износу бандажей этих КП и рельсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лужнов Ю. М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. М.: Интекст, 2009. 176 с.
2. 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.
3. Logston C. F. Itami Locomotive Friction-creep studies // ASME Journal of Engineering for Industry. 1980. Vol. 102. P. 275–281.
4. Ляпушкин Н. Н. Прогнозирование сцепных свойств локомотивов с различными типами тяговых электродвигателей: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. М., 2013. 46 с.
5. Меншутин Н. Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1961. 18 с.
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. Бушер М. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом // Железные дороги мира. 1994. № 4. С. 30–45.
10. Модель взаимодействия колеса и рельса с учетом дискретного строения металла контактирующих тел / Г. П. Бурчак [и др.] // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 21–28.
11. Розенфельд В. И., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
12. Шилин Н. Д., Прокофьев С. Н. Разработка алгоритмов повышения тяговых и сцепных свойств электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. (Шербинка, 26–27 августа 2021 г.). М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 209–214.

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. Samme G. V. Friksionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s rel'sami. Teoriya i praktika stsepleniya lokomotiva [Frictional interaction of wheelsets of a locomotive with rails. Theory and practice of locomotive adhesion]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Railway transport education centre] Publ.; 2014. 104 p. (In Russ.).
3. Logston C. F. Itami Locomotive Friction-creep studies. ASME Journal of Engineering for Industry. 1980;(102):275-281.
4. Lyapushkin N. N. Prognozirovaniye stsepykh svoystv lokomotivov s razlichnymi tipami tyagovykh elektrodvigatelay [Forecasting the coupling properties of locomotives with different types of traction motors]. Synopsis of Dr. of Sci. thesis: 05.22.07. Moscow; 2013. 46 p. (In Russ.).
5. Menshutina N. N. Issledovanie skol'zheniya kolesnoy pary elektrovoza pri realizatsii sily tyagi [Investigation of the sliding of an electric

locomotive wheelset in the implementation of traction force]. Synopsis of Cand. of Sci. thesis: 05.00.00. Moscow; 1961. 18 p. (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. SLM Winterthur. [S. 1.]; 1992.

8. Polach O. Optimierung modern Lok-Drehgestelle durch fahrzeug-dynamische Systemanalyse. *Eisenbahningenieur*. 2002;53(7):50-57.

9. Busher M. Regulirovanie proskal'zyvaniya koles na elektrovozakh s asinkhronnym tyagovym privodom [Regulation of wheel slip on electric locomotives with asynchronous traction drive]. *Zheleznye dorogi mira = Railways of the World*. 1994;(4):30-45. (In Russ.).

10. Burchak G. P., Vasil'ev A. P., Lyapushkin N. N., et al. Model' vzaimodeystviya koleasa 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 mashinostroyeniya = Russian Engineering Research*. 2019;(2):21-28. (In Russ.).

11. Rozenfel'd V. I., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriya elektricheskoy tyagi: ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta [Theory of electric traction: textbook for railway transport universities]. 2nd ed. Moscow: Transport Publ.; 1983. 328 p. (In Russ.).

12. Shilin N. D., Prokof'ev S. N. Razrabotka algoritmov povysheniya tyagovykh i stepnykh svoystv elektrovozov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Development of algorithms for improving the traction and coupling properties of electric locomotives with asynchronous traction motors]. *Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon]*. Proc. of I Int. scientific conf. (Shcherbinka, August 26–27, 2021). Moscow: VNIIZhT Publ.; 2021. P. 209–214. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никита Дмитриевич ШИЛИН,

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

Сергей Николаевич ПРОКОФЬЕВ,

ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita D. SHILIN,

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

Sergey N. PROKOF'EV,

Leading Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.)

ВКЛАД АВТОРОВ

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

Сергей Николаевич ПРОКОФЬЕВ. Формулировка целей и задач, обозначение алгоритмов исследования (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Nikita D. SHILIN. Review of the main research areas, description of materials and methods, processing and analysis of the results (50%).

Sergei N. PROKOF'EV. Formulation of goals and objectives, designation of research algorithms (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 09.03.2022, первая рецензия получена 11.03.2022, вторая рецензия получена 29.03.2022, принята к публикации 17.05.2022.

The article was submitted 09.03.2022, first review received 11.03.2022, second review received 29.03.2022, accepted for publication 17.05.2022.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

УСТРОЙСТВО ОТВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
А. А. Крылов, А. В. Куликов, А. А. Царьков

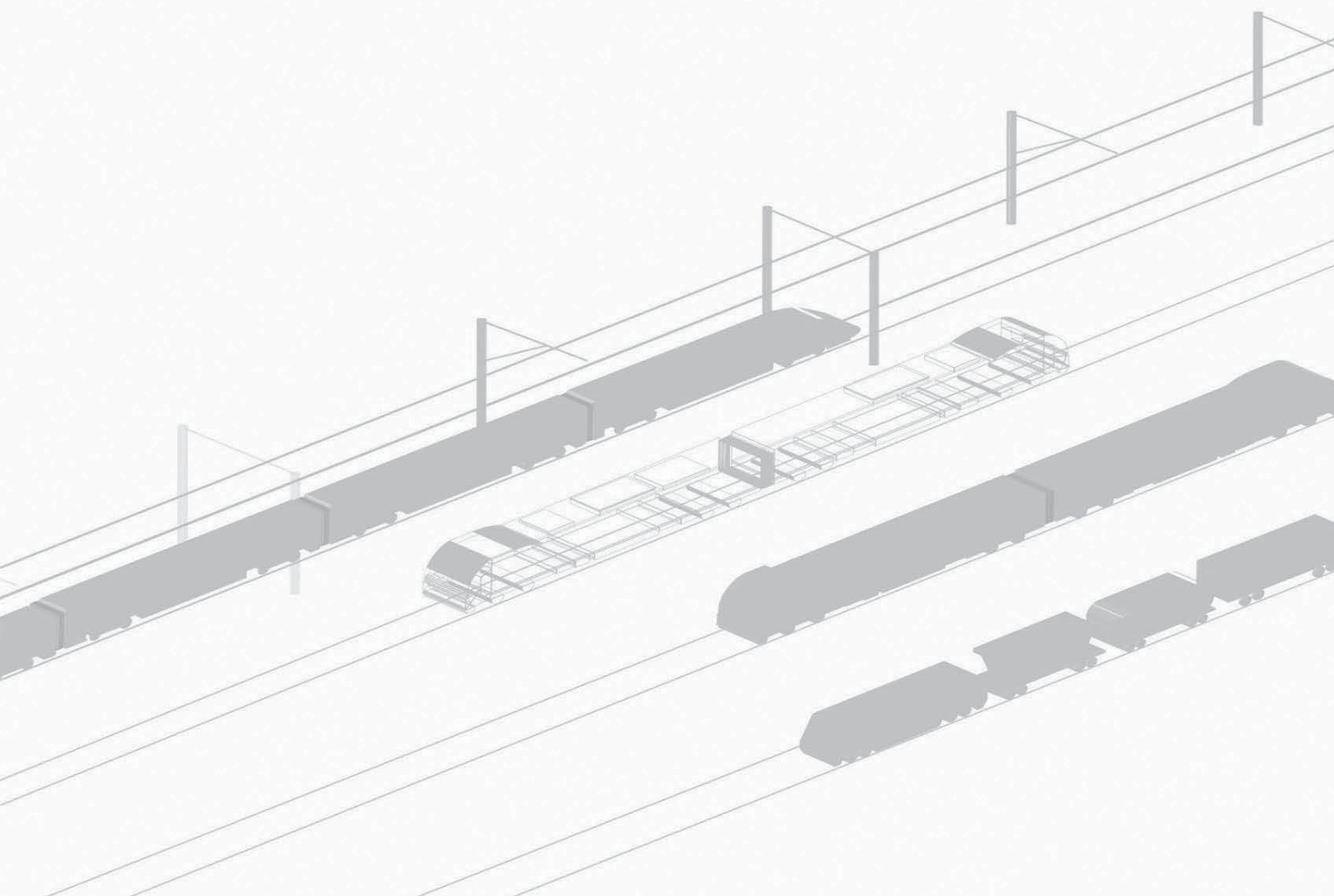
Заявляемое решение относится к устройству, реализующему отвод действующей контактной сети в зоне погрузки/выгрузки вагонов и контейнерных (фитинговых) платформ на боковых приемоотправочных путях промежуточных (опорных) железнодорожных станций и терминально-логистических центров, и позволяет повысить надежность отвода контактной сети при одновременном обеспечении максимально требуемого габарита для работы вертикальных погрузчиков в зоне погрузки/выгрузки вагонов и контейнерных (фитинговых) платформ на железнодорожных

станциях и в терминально-логистических центрах. Это достигается тем, что освобождается надвагонное пространство от контактной сети, причем отвод контактной сети осуществляется путем ее перемещения вверх к опоре контактной сети, для чего изменяется геометрия контактной сети посредством привода, системы тяг, включающей тягу привода, консоль, поддерживающую тягу, синхронизирующую тягу и регулировочную тягу, и шарнирно-поворотных узлов, связывающих систему тяг с опорой контактной сети и переходным профилем, связанным с контактным проводом.

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.22

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169

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



ОЦЕНКА БАЛАНСА ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛИГОНОВ СЕТИ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

А. Ф. Бородин^{1,2}✉, В. В. Панин^{1,2}, М. А. Агеева¹, А. Ю. Соколов¹,
С. Ю. Кириллова¹, Е. О. Дмитриев^{1,2}, А. А. Кравченко^{1,2}

¹Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ),
Москва, Российская Федерация

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Пропускные и провозные способности железнодорожных полигонов и транспортные потоки в течение года не постоянны. Допустимые уровни использования пропускной способности определяются из условия беспрепятственного приема поездов станциями. Необходимо рассчитывать баланс провозной способности, позволяющий совместить растущие перевозки с высокими темпами развития инфраструктуры и ремонтных работ. Цель исследования — разработка методических решений для оценки баланса перевозочной мощности железных дорог и обоснования порядка реализации инфраструктурных мероприятий в условиях нарастающей динамики предъявления грузов к перевозке и жестких сроков проведения работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры.

Материалы и методы. Разработанные решения базируются на данных информационных систем ОАО «РЖД», автоматизированном прогнозе инфраструктурных и перевозочных ресурсов железнодорожной сети и гибридных математических моделях.

Результаты. Представлены результаты обоснования нормативных ограничений суточного бюджета времени для пропуска поездов в зависимости от классификации и специализации железнодорожных линий. Определен порядок расчета пропускной способности участков при автоматической локомотивной сигнализации как самостоятельном средстве интервального регулирования движения поездов с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков. Определены характеристики наличной, расчетной, планируемой и потребной пропускной и провозной способностей с разграничением мероприятий по развитию пропускных и провозных способностей и программам инфраструктурных хозяйств. Предложена задача компромиссного управления по обеспечению предъявляемых объемов грузовых и пассажирских перевозок, заданного объема реконструктивных работ по развитию инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности. Представлена классификация реконструктивных, технологических, организационно-технических и комплексных мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях истощения инфраструктурных и графиковых ресурсов.

Обсуждение и заключение. Разработанные решения позволяют повысить обоснованность и эффективность комплексных проектов по развитию пропускных и провозных способностей и мероприятий по совершенствованию эксплуатационной работы полигонов железнодорожной сети.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: баланс провозной способности, перевозочная мощность, инфраструктурные мероприятия, бюджет времени, интервальное регулирование, организация движения, компромиссное управление, неравномерность транспортных процессов, прогноз ресурсов сети, гибридные математические модели

Для цитирования: Бородин А. Ф., Панин В. В., Агеева М. А., Соколов А. Ю., Кириллова С. Ю., Дмитриев Е. О., Кравченко А. А. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 158–169. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169>.

✉ borodinaf@mail.ru (А. Ф. Бородин)

© Бородин А. Ф., Панин В. В., Агеева М. А., Соколов А. Ю.,
Кириллова С. Ю., Дмитриев Е. О., Кравченко А. А., 2022

Original article

UDK 656.22

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169

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



ASSESSMENT OF TRANSPORTATION CAPACITY BALANCE OF RAILWAY NETWORK POLYGONS

Andrey F. Borodin^{1,2}✉, Vitaliy V. Panin^{1,2}, Marina A. Ageeva¹, Andrey Yu. Sokolov¹,
Svetlana Yu. Kirillova¹, Egor O. Dmitriev^{1,2}, Artem A. Kravchenko^{1,2}

¹Institute of Economics and Development of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Traffic and transportation capacities of railway polygons and traffic flows are not constant throughout the year. Permissible capacity levels are determined by the condition of unhindered reception of trains by stations. It is necessary to calculate the balance of transportation capacity, making it possible to combine growing traffic with high rates with infrastructure development and repair works. The purpose of the study is to develop methodological solutions for assessing the balance of the railway transportation capacity and substantiating the procedure for implementing infrastructure measures in the context of the growing dynamics of the originating traffic and the tight deadlines for repairing and reconstructing the infrastructure.

Materials and methods. The developed solutions are based on the data of the Russian Railways information systems, automated forecasting of the infrastructure and transportation resources of the railway network, and hybrid mathematical models.

Results. The article presented the results of the substantiation of the normative restrictions on the daily time budget for the passage of trains, depending on the classification and specialisation of railway lines. The procedure for calculating the traffic capacity of sections with automatic locomotive signalling is determined as an independent means of interval control of train traffic with movable boundaries of block sections that change depending on the speed and mass of the train. The characteristics of the available, estimated, planned and required traffic and transportation capacities were determined with a distinction between measures for the development of traffic and transportation capacities and programs for improvement of infrastructure facilities. The authors put forward the problem of compromise management to ensure the required volumes of freight and passenger traffic, a given volume of reconstruction work on the development of infrastructure and repair work to maintain the required degree of its readiness. A classification of reconstructive, technological, organisational, technical and complex measures of influence on the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources was presented.

Discussion and conclusion. The developed solutions enable to increase the feasibility and efficiency of complex projects for the development of traffic and transportation capacities and measures to improve the operation of railway network polygons.

KEYWORDS: carrying capacity balance, transportation capacity, infrastructure measures, time budget, interval control, traffic organisation, compromise management, uneven transport processes, network resource forecast, hybrid mathematical models

For citation: Borodin A. F., Panin V. V., Ageeva M. A., Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu., Dmitriev E. O., Kravchenko A. A. Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):158-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169>.

Введение. В докладе [1] опубликованы результаты исследований параметров организации работы полигонов железнодорожной сети, включающих в себя грузонапряженные направления и крупные узлы с высокой интенсивностью пассажирского дальнего и пригородно-городского движения, в современных условиях, когда требуется совместить растущие перевозки с высокими темпами реконструкции инфраструктуры и ремонтных работ, а также результаты разработки методики для расчетов этих параметров.

Перевозочная мощность железнодорожной сети и ее элементов в течение года не остается постоянной. Поточная нагрузка характеризуется не только неравномерностью отправления пассажиров, неравномерным предъявлением к перевозке грузов и порожних вагонов, не принадлежащих перевозчику [2, 3], но и зависимостью от технологии организации и продвижения транспортных единиц.

Поэтому, как показано в работе [4], необходимо для конкретных календарных периодов вычислять баланс провозной способности железнодорожных полигонов исходя из беспрепятственного продвижения поездопотоков без задержек по неприятию станциями, внешними стыковыми пунктами полигона, а также без задержек обмена вагонами с железнодорожными путями необщего пользования.

Указанный баланс провозной способности должен определяться расчетом на математических моделях конкретных полигонов, позволяющих вычислять, с одной стороны, перевозочные мощности и, с другой стороны, реально достижимые уровни их использования при определенной динамике транспортных потоков (рис. 1).

Оценка перевозочной мощности железнодорожной инфраструктуры. Специалистами АО «ИЭРТ» с участием АО «ВНИИЖТ» и АО «НИИАС» подготовлена Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [5], конкретизирующая положения Методики [6] в части, отнесенной к ведению владельца инфраструктуры.

В Инструкции [5] для исключения противоречий в трактовке терминов сформулированы определения потребной (необходимой), планируемой (проектируемой), расчетной, наличной пропускных и провозных способностей.

Потребные провозная и пропускная способности подлежат расчету при решении как задач развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов при перспективном планировании, так и задач использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов в условиях текущей эксплуатации. При их расчете рассматривают структуру и мощность потоков грузов и поездов с учетом годовой и внутримесячной неравномерности пассажирских и грузовых перевозок.

Планируемые (проектируемые) провозная и пропускная способности определяются при обосновании мероприятий по совершенствованию технологии работы и технического оснащения, строительства или развития железнодорожных линий, станций и узлов. Факторы, учитываемые при их расчете, — нормативные значения коэффициентов надежности железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава α_n и суточного (в годовом разрезе) бюджета времени выполнения работ по текущему содержанию и плановых видов ремонта устройств инфраструктуры $t_{\text{тех}}$, планируемые реконструктивные, технические, технологические и организационные мероприятия. Сопоставление расчетов потребной и планируемой пропускных способностей обеспечивает проверку достаточности планируемого развития железнодорожной инфраструктуры.

Расчетные провозная и пропускная способности применяются в решении задач планирования мероприятий по развитию пропускных и провозных способностей. Учитываемые здесь факторы — действующее путевое развитие и техническое оснащение, нормативные значения α_n и $t_{\text{тех}}$. Сопоставление планируемой и расчетной пропускных способностей обеспечивает проверку необходимости планируемого развития железнодорожной инфраструктуры.

Наличные провозная и пропускная способности подлежат расчету для планирования мероприятий по ремонту и модернизации устройств инфраструктуры. Учитываемые факторы — действующее путевое развитие и техническое оснащение, соотношения размеров движения поездов различных категорий, длительно действующие предупреждения об ограничении скорости; при этом значения α_n и $t_{\text{тех}}$ принимаются на основе актуальных данных расчетного периода. Сопоставление расчетной и наличной пропускных способностей определяет потери пропускной способности из-за несоблюдения проектных параметров технических средств и обеспечивает проверку необходимости работ по устранению инфраструктурных ограничений, вызывающих данные потери.

Результирующая пропускная способность расчетного участка, узла или станции применяется в решении задач технологии перевозочного процесса, управления движением и доступа к услугам инфраструктуры в условиях текущей эксплуатации. При этом учитывают емкости путевого развития и длины станционных путей, технически допустимые уровни использования мощности устройств при беспрепятственном приеме поездов.

Результирующая пропускная способность направления (полигона) железнодорожной сети необходима при распределении транспортных потоков, мероприятий и инвестиций по маршрутам следования и при мониторинге целевых показателей развития железнодорожной сети. При этом учитывают влияние смежных участков

(объективные потери из-за несоответствия структуры транспортных потоков и топологии полигонов).

Разграничение мероприятий по развитию пропускной способности и мероприятий по ремонту и модернизации устройств инфраструктуры в зависимости от соотношений значений пропускной способности показано на рис. 2.

В Инструкции [5] регламентирован расчет пропускной способности железнодорожных участков по перегонам в зависимости от специализации железнодорожной линии для преимущественно грузового или пассажирского движения. Для расчета пропускной способности однопутных и однопутно-двухпутных участков с непарностью размеров движения установлены зависимости между числом четных и нечетных поездов. Классифицированы варианты организации работы участков подтапливания с выводом соответствующих расчетных формул. Регламентирован расчет пропускной способности в период проведения ремонтно-строительных работ с закрытием главных путей перегонов на длительный срок.

В раздел «Расчет пропускной способности железнодорожных участков по перегонам» включены также результаты исследования [7], где обоснована необходимость обеспечения непрерывности следования поездов разных категорий между станциями технологических стоянок, взаимного расположения поездов в тактовом графике и на смежных участках при расчете участков с непараллельным графиком движения поездов и участков с интенсивным пригородным и пригородно-городским движением. Впервые регламентирован расчет пропускной способности при тактовом графике движения пассажирских поездов [7]. Сформулированы критерии разделения железнодорожных линий на соответствующие участки (табл. 1). Уточненный порядок определения коэффициентов съема на однопутных и однопутно-двухпутных участках учитывает количество отдельных пунктов, имеющих приемоотправочные пути вместимостью, обеспечивающей прием грузовых поездов с длиной составов, установленной графиком движения поездов.

Значения α_n и $t_{\text{тех}}$ определяются с учетом интенсивности и скоростей движения поездов и представлены в табл. 2 в зависимости от специализации и классификации железнодорожных линий. Здесь согласно [8, 9] приняты классы (1–5) железнодорожных линий и их специализация (высокоскоростная В, скоростная С, особо грузонапряженная О, малоинтенсивная М, с тяжеловесным грузовым движением Т, преимущественно пассажирским движением П, преимущественно грузовым движением Г).

Совместно с АО «НИИАС» исследована пропускная способность при внедрении инновационных систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП) [10]. Пропускная способность двухпутного перегона при автоматической локомотивной сигнала-



Рис. 1. Схема оценки баланса перевозочной мощности полигонов сети железных дорог

Fig. 1. Diagram for estimating the transportation capacity balance of the railway network polygons

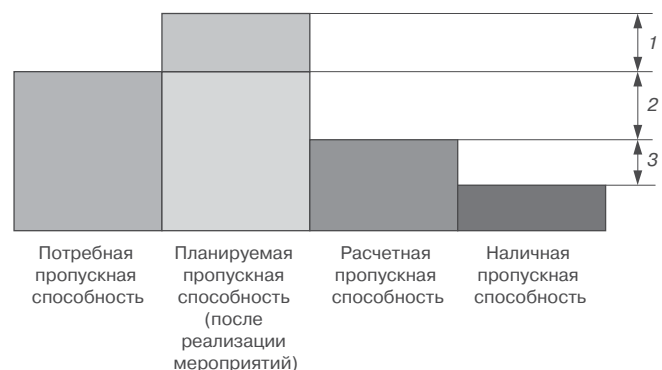


Рис. 2. Сопоставление показателей пропускной способности: 1 — технически необходимая доля пропускной способности (по допустимому уровню использования); 2 — мероприятия по развитию пропускных и провозных способностей; 3 — мероприятия по ремонту и модернизации железнодорожной инфраструктуры (по программам инфраструктурных хозяйств)

Fig. 2. Comparison of traffic capacity indicators: 1 — technically necessary share of traffic capacity (according to the acceptable level of use); 2 — measures to develop traffic and transportation capacities; 3 — measures to repair and modernisation the railway infrastructure (according to programmes of infrastructure facilities)

лизации как самостоятельном средстве ИРДП с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков, пар поездов/сут, определяется по формуле

$$n = (1440 - t_{\text{тех}}) \alpha_n \left(\frac{\sigma}{I_{\text{и.р}}} + \frac{\lambda}{I_{\text{всц}}} + \frac{1 - \sigma - \lambda}{I_p} \right), \quad (1)$$

где 1440 — суточный лимит времени, мин; $I_{\text{и.р}}$ — расчетный межпоездный интервал между поездами

Таблица 1
Классификационные признаки железнодорожных участков

Table 1

Classification features of railway sections

Термин	Определение
Расчетный участок	Часть железнодорожной сети с одинаковыми: количеством главных путей; средствами сигнализации и связи по движению поездов; видом локомотивной тяги и родом тягового тока
Границы расчетных участков	Станции, где предусмотрено выполнение технических операций: расформирование и формирование поездов, смена локомотивов или локомотивных бригад, подготовка составов поездов в рейс, оборот пассажирских поездов дальнего следования и пригородного сообщения; станции или отдельные пункты примыкания одного или нескольких направлений; станции, где изменяются размеры движения грузовых и пассажирских поездов
Участок определения коэффициента съема пропускной способности	Один или несколько последовательно расположенных расчетных участков с одинаковым количеством главных путей, по которым поезда следуют без технических операций

попутного направления при ИРДП с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков, мин; $I_{всц}$ — межпоездной интервал между поездами в режиме движения по технологии «виртуальная сцепка», мин; I_p — расчетный межпоездной интервал при ИРДП с фиксированными границами блок-участков, мин; σ — доля интервалов между грузовыми поездами в общем

поездотоке, следующими с локомотивами, оборудованными автоматической локомотивной сигнализацией как самостоятельным средством ИРДП, с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков; λ — доля интервалов между грузовыми поездами в общем поездотоке, следующими в режиме движения по технологии «виртуальная сцепка».

Порядок расчета пропускной способности железнодорожных станций учитывает неоднородность структуры поступающих, обрабатываемых и отправляемых потоков поездов. Для этого введены коэффициенты съема производительности устройств, аналогичные коэффициентам съема пропускной способности участков по перегонам и впервые предложенные в [11]:

- коэффициенты съема пропускной способности для поездов в расформирование ϵ_p , поездов своего формирования ϵ_f и транзитных поездов без переработки $\epsilon_{тр}$ показывают количество однопутных поездов соответствующей категории и установленной графической длины состава, которому эквивалентно занятие элемента станционной инфраструктуры поездом рассматриваемой категории и (или) направления;

- коэффициенты съема перерабатывающей способности сортировочного устройства $\epsilon_{пер}$ показывают количество составов однопутных поездов установленной графической длины без вагонов, запрещенных к роспуску, которому эквивалентно занятие сортировочного устройства составом рассматриваемой категории и (или) направления;

- коэффициенты съема числа назначений формируемых поездов $\epsilon_{назн}$ показывают количество назначений однопутных поездов установленной графической длины, которому эквивалентно занятие сортировочных путей поездным назначением рассматриваемой категории и (или) направления.

Значения α_n и t_{tex} в зависимости от специализации и классификации железнодорожных линий

Таблица 2

Values α_n and t_{tex} depending on the specialisation and classification of railway lines

Table 2

Класс линии	α_n							t_{tex} , мин						
	В	С	О	П	Г	Т	М	В	С	О	П	Г	Т	М
1	0,96	0,95	0,93	0,93	0,93	0,93	—	150	150	150	150	150	150	—
2	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	150	150	150	150	150	150	75
3	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	150	90	90	90	90	90	75
4	—	0,95	—	0,96	0,96	0,96	0,95	—	90	—	75	75	75	75
5	—	—	—	0,96	0,96	0,96	0,95	—	—	—	75	75	75	75

Указанные коэффициенты зависят от массы и длины составов, числа сформированных групп вагонов в составах, наличия вагонов, запрещенных к роспуску, режима перевозки и ряда других характеристик.

Оценка целевых показателей комплексных проектов. ОАО «РЖД» утверждена Методика расчета планируемых и фактических показателей провозной и пропускной способностей железнодорожных магистралей и железнодорожных подходов к портам (в направлении портов и пограничных переходов) [12], предназначенная для мониторинга этапности достижения целевых показателей национального проекта «Транспортная часть комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» [13].

Фактические условия функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры, введенных в эксплуатацию, могут существенно отличаться от запроектированных. Это связано с рядом факторов, основные из которых — структура и мощность грузопотоков, структура вагонных парков и система управления их работой, динамичность спроса на пассажирские перевозки, тарифные условия. Поэтому расчет результирующей пропускной способности железнодорожных магистралей и подходов к портам должен производиться в приведенных единицах (к грузовым поездам установленной нормы массы и длины) через коэффициенты съема, чтобы исключить влияние возможных в перспективе изменений потоковой структуры на оценку достигнутых результатов выполненного комплекса инфраструктурных мероприятий.

Решение базируется на стандартной задаче о максимальном потоке в сети [14], но не может быть сведено к ней в силу высокого влияния фактора смежных систем на использование наличной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры.

В работе [7] отмечено явление потерь пропускной способности из-за несинхронности поступления поездов со смежных расчетных участков. Наряду с указанной несинхронностью наиболее распространенными факторами, не позволяющими использовать расчетную пропускную способность участков, являются ограничения по вместимости и количеству приемоотправочных путей на промежуточных и технических станциях, различие времен хода пассажирских и грузовых поездов, порядок пропуска поездов по станциям по условиям продольного профиля пути прилегающих перегонов (наличие затяжных спусков, руководящих и инерционных подъемов). Несовпадение времени нормативных технологических «окон» и пиковые периоды движения пригородных поездов, сходящихся с разных направлений, наиболее критичны для предузловых участков и магистральных внутриузловых ходов.

Возможность прокладки транзитных ниток графика от начальной до конечной станции участка зна-

чительно снижается из-за враждебности маршрутов в горловинах узловых станций, отсутствия приемоотправочных путей необходимой вместимости на промежуточных станциях направления, часов пик в пригородном сообщении, режимов работы искусственных сооружений и иных причин.

Отдельно каждый из этих факторов можно оценить аналитически, записав соответствующие формулы. Но на практике возникают неблагоприятные сочетания нескольких одновременно действующих факторов. Как показывают сопоставления аналитических расчетов с построением максимальных графиков движения, это приводит к потерям до 15 % расчетной пропускной способности. В [7] сформулированы рекомендации по расчету данных потерь экспериментально (путем построения насыщенных графиков движения поездов) или с применением имитационного моделирования.

Учет влияния рассматриваемых эксплуатационных факторов при определении пропускной способности характеризует зависимость

$$n^* = n_n - (\Delta n_{\text{съема}} + \Delta n_{\text{необх}} + \Delta n_{\text{нер}}), \quad (2)$$

где n^* — технически возможный среднегодовой грузовой поездопоток (размеры движения для результирующих показателей комплексного плана модернизации инфраструктуры), пар поездов/сут; n_n — максимальная (теоретическая) пропускная способность по ограничивающему элементу (параллельный график движения), пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{съема}}$ — съем пропускной способности поездами категорий, отличных от расчетной [7], пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{необх}}$ — снижение пропускной способности по технически допустимому коэффициенту заполнения, формула (7.2) Методики [6], пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{нер}}$ — снижение пропускной способности по коэффициенту неравномерности грузового движения, формула (8.4) Методики [6], пар поездов/сут. При этом реализуемая пропускная способность, пар поездов/сут, определяется по формуле

$$n_p = n^* + \Delta n_{\text{нер}}. \quad (3)$$

Учет влияния эксплуатационных факторов при расчете провозной способности определяет соотношение

$$\Gamma^{**} = \Gamma - \Delta \Gamma, \quad (4)$$

где Γ^{**} — результирующая провозная способность с учетом ограничений на пути следования транспортного потока, млн т/год; Γ — результирующая провозная способность полигона, млн т/год, определяемая в зависимости от значений n^* ; $\Delta \Gamma$ — часть провозной способности, учитывающая влияние смежных участков (объективные потери из-за структуры корреспонденций), млн т/год.

Вариативность стратегий организации движения и проектно-строительных работ. Транспортные системы должны функционировать в течение всех сезонных и оперативных изменений эксплуатационной обстановки и потребностей в перемещении грузов и пассажиров. Как показано в исследовании [4], для этого в мероприятия по развитию инфраструктуры должны закладываться возможности эффективного применения вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети. Это касается унификации массы и длины грузовых поездов на параллельных ходах, размещения и развития сортировочных, пассажирских (в том числе пассажирских технических) станций, транспортно-логистических центров, вагонно-линейного и локомотивного хозяйства, концентрации и (или) дублирования однородных операций в транспортных узлах, организации подготовки порожних вагонов и размещения грузовых вагонов неэксплуатируемого парка.

В условиях текущей эксплуатации это позволит снижать общую ресурсоемкость перевозочного процесса путем перенастройки режимов функционирования за счет перенаправления транзитных вагонопотоков, перераспределения сортировочной работы, дифференциации норм массы и длины составов, использования непарности движения и др. Например, при наличии параллельных двухпутного и однопутного железнодорожных ходов организация пропуска поездов повышенной длины в порожнем направлении на двухпутном ходу позволяет создать непарность движения на однопутном ходу, увеличить за счет этого число поездов в грузовом направлении.

Значение вариантных технологических режимов возрастает в периоды ремонтно-строительных работ, которые необходимо завершать на конкретных объектах к определенным календарным срокам. Потребность в интенсивном ведении этих работ с закрытием путей и перерывами в движении поездов нередко совпадает с потребностью в интенсификации перевозок.

Имеет место задача компромиссного управления по обеспечению, с одной стороны, растущих объемов грузовых и пассажирских перевозок, с другой — необходимого объема реконструктивных работ по развитию инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности.

В каждом сценарии организации перевозок, строительных и ремонтных работ i для каждого месяца (в общем случае — календарного периода) t имеют место планируемые среднесуточные размеры грузового движения $n_{пл}(t)_i$, поездов/сут, объемы ремонтных и реконструктивных работ $W(t)_i$, км, технически допустимые среднесуточные размеры грузового движения $n_t(t)_i$, поездов/сут, и их снижение из-за закрытия устройств при ведении работ $\Delta n_t(t)_i$, поездов/сут. Ве-

личина риска неосвоения объемов перевозок в календарном периоде t составляет

$$\Delta \Gamma(t)_i = \begin{cases} [n_{пл}(t)_i - (n_t(t)_i - \Delta n_t(t)_i)] \varphi Q_{бр} D(t)_i, \\ \text{если } n_{пл}(t)_i - (n_t(t)_i - \Delta n_t(t)_i) > 0; \\ 0, \\ \text{если } n_{пл}(t)_i - (n_t(t)_i - \Delta n_t(t)_i) \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $Q_{бр}$ — средневзвешенная масса брутто грузовых поездов, проследующих по участку в грузовом направлении за расчетный период, т; φ — отношение массы состава нетто к массе состава брутто (с учетом порожнего вагонопотока, следующего в грузовых поездах в грузовом направлении); $D(t)_i$ — число суток в календарном периоде t .

Например, сценарий 1 с максимальным объемом ремонтных и реконструктивных работ за расчетный период $t = 1, \dots, T$ генерирует потери объемов перевозок из-за закрытия устройств

$$A_1 = \sum_{t=1}^T \Delta \Gamma(t)_i. \quad (6)$$

Сценарий 2 с уменьшенным объемом работ соответственно уменьшает потери $\Delta n_t(t)_2$, но в последующих календарных периодах уменьшаются значения $n_t(t)_2$ из-за более позднего ввода объектов в эксплуатацию и несвоевременного проведения ремонтов. В случаях, когда на рассчитываемых участках не соблюдаются установленные межремонтные сроки, в расчете наличной пропускной способности должно приниматься увеличение перегонных времен хода поездов из-за длительно действующих ограничений скорости, а также снижение коэффициента надежности α_n из-за вероятного увеличения числа и длительности технических отказов. В результате потери объемов перевозок за расчетный период могут составить

$$A_2 = \sum_{t=1}^T \Delta \Gamma(t)_2 > A_1. \quad (7)$$

Для снижения рисков неосвоения объемов перевозок необходимы:

- 1) технология ремонта инфраструктуры, обеспечивающая повышение выработки в «окна» и на закрытых перегонах (по сравнению с фактически достигнутой в настоящее время);
- 2) проекты организации строительства со снижением необходимого времени закрытия движения;
- 3) организация движения в периоды ограничения в движении на основе методов форсированного использования пропускной способности;
- 4) согласованное планирование погрузки и этапности ремонтно-строительных работ.

В терминах [15] задачи (1)–(3) являются задачами самоуправления соответственно в ремонтном

комплексе инфраструктуры, проектно-строительном комплексе и в вертикали управления движением, а задача (4) — задачей координации.

На основе данных о перспективных объемах погрузки на расчетные 10 лет с использованием АС ПРОГРЕСС [16] выполняются варианты расчеты рисков неосвоения перевозок. Результаты расчетов при двух вариантах ремонта инфраструктуры и реализации строительных мероприятий по одному из сетевых направлений представлены на рис. 3 и 4. Средневзвешенные значения выработки путевых машинных станций (ПМС) по всем видам ремонтов на втором, третьем и четвертом году эксплуатации снижаются относительно первого года в связи с износом существующей техники и незначительной закупкой новой (см. рис. 3). Риски неосвоения перевозок достигают 6 млн т в год и более. В варианте, когда в течение 5–10 лет идет равномерная закупка новых путевых машин и увеличение производительности ПМС при росте объемов перевозок на всем рассматриваемом периоде, уже к пятому году риски неосвоения перевозок снижаются до минимума.

Результирующие показатели передачи поездов по междорожному стыковому пункту приведены на рис. 4, где для вариантов с увеличением выработки ПМС и без него приведена технически допустимая передача для стыкового пункта $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$ в сравнении с планируемой пропускной способностью $n_{\text{год}}^{**}$ и планируемым образованием поездопотока на стыковой пункт $n_{\text{обр}}$.

Процессы проектирования, строительства и реконструкции объектов железнодорожного транспорта в силу своей длительности, капиталоемкости и ресурсоемкости диктуют требования инвариантности реконструктивных мероприятий к изменениям исходных данных. Строительство раздельного пункта, станционного парка, дополнительного перегонного главного пути не может быть назначено или отменено исходя из текущих колебаний потоковой нагрузки, не всегда надежно прогнозируемых. При этом в зависимости от изменений транспортных потоков и технологии перевозочного процесса будут изменяться компоненты технологии организации движения и эксплуатационные показатели. Система расчетов интенсификации перевозок в условиях инфраструктурного развития полигонов сети железных дорог должна обеспечивать минимизацию среднего экономического риска, а также применять робастные алгоритмы, обеспечивающие устойчивость рассчитанных мероприятий к изменениям входных параметров [17]. При этом следует рассчитывать граничные значения эксплуатационных показателей, в пределах которых наборы реконструктивных мероприятий не потребуют перехода к более мощному техническому развитию.

При значительных резервах пропускной способности железнодорожных участков или направлений

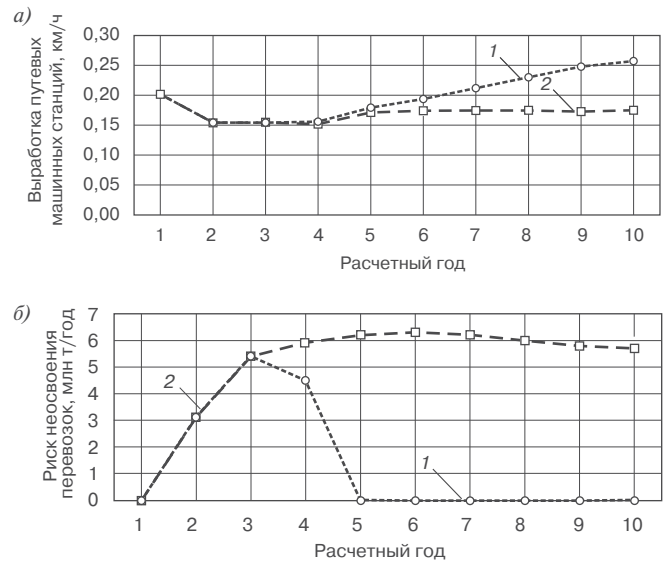


Рис. 3. Выработка путевых машинных станций (а) и риски неосвоения перевозок (б) на расчетные годы: 1 — с повышением производительности; 2 — без повышения производительности

Fig. 3. Development of track laying machine stations (a) and the risks of non-development of transportation (b) for the calculation years: 1 — with increased productivity; 2 — no performance improvement

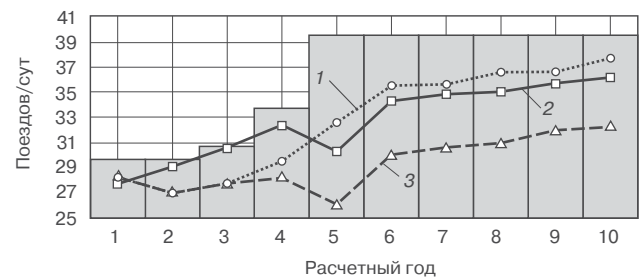


Рис. 4. Изменение технически допустимых размеров передачи по стыковому пункту полигона $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$: 1 — $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$ с увеличением выработки путевых машинных станций; 2 — планируемое образование поездопотока на стыковой пункт $n_{\text{обр}}$; 3 — $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$ без увеличения выработки путевых машинных станций; выделенная зона — планируемая пропускная способность $n_{\text{год}}^{**}$

Fig. 4. Change in the technically permissible dimensions of the transfer at the polygon division point $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$: 1 — $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$ with an increase in the output of track laying machine stations; 2 — planned formation of train traffic to the division point $n_{\text{обр}}$; 3 — $n_{\text{год}}^{**} - \Delta n_{\text{год}}$ without an increase in the output of the track laying machine stations; allocated area — planned traffic capacity $n_{\text{год}}^{**}$

для устойчивой поездной работы в качестве расчетных следует принять среднесуточные размеры грузового движения максимального месяца, увеличенные на полтора среднеквадратичных отклонения [18], но в условиях исчерпания инфраструктурных и графических ресурсов, необходимости проведения «окон»

Таблица 3

Классификация мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях истощения инфраструктурных и графиковых ресурсов

Table 3

Classification of measures to influence the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources

Меры воздействия	Содержание мер	Влияние на элементы расчета						
		n_n	$\Delta n_{\text{схема}}$	$\Delta n_{\text{пер}}$	n^*	Γ	$\Delta \Gamma$	Γ^{**}
1. Реконструктивные	1.1. Увеличение наличной пропускной способности перегонов, внутриузловых ходов и соединительных ветвей	↑			↑			↑
	1.2. Реконструкция промежуточных станций, обеспечивающая снижение потерь пропускной способности с пропуском поездов заданных (в том числе гибких) норм массы и длины составов		↓		↑	↑		↑
2. Технологические	2.1. Снижение потерь пропускной способности из-за влияния смежных устройств путем трансформации потоковой структуры и графика движения						↓	↑
	2.2. Освоение пикового поездообразования за счет гибких (в сторону увеличения) норм массы и длины поездов			↓	↑	↑		↑
	2.3. Применение вариантных путей пропуска поездов и непарности движения				↑		↓	↑
	2.4. Технология организации вагонопотоков в поезда на инфраструктурах общего и необщего пользования, обеспечивающая эффективное использование лимитирующих транспортных объектов					↑	↓	↑
3. Организационно-технические	3.1. Согласованное оперативное планирование и задрессовка груженных и порожних вагонов в соответствии с доступными инфраструктурными и графиковыми ресурсами			↓	↑		↓	↑
	3.2. Структура оперативного управления движением, обеспечивающая минимум потерь времени и затрат на координацию решений на стыках управляющих звеньев			↓	↑		↓	↑
4. Комплексные	4.1. Уменьшение коэффициентов съема пропускной способности поездами различных категорий		↓		↑			↑
	4.2. Создание и использование регулирующих емкостей станционных парков на железнодорожных инфраструктурах общего и необщего пользования			↓	↑		↓	↑
	4.3. Технология тягового обслуживания, обеспечивающая реализуемость рассчитываемой системы поездной работы			↓	↑		↓	↑

по ремонту, строительству и реконструкции инфраструктуры требуются решения на базе комплекса мер, классификация которых представлена в табл. 3. Здесь показано влияние этих мер (↑ — увеличение, ↓ — уменьшение) на составляющие формул (2)–(4).

Для технико-экономических расчетов по решению данной задачи разработан и развивается комплекс гибридных математических моделей в составе взаимодействующих прикладных автоматизированных систем [19, 20] с использованием результатов [21, 22, 23].

Заключение и обсуждение. Баланс провозной способности железнодорожных полигонов определяется, с одной стороны, их перевозочной мощностью, с другой — реально достижимыми уровнями ее использования при определенной динамике транспортных потоков, исходя из беспрепятственного продвижения последних.

Разграничение понятий потребной (необходимой), планируемой (проектируемой), расчетной, наличной пропускной и провозной способностей в новой Инструкции по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» обеспечивает оценку необходимости мероприятий по развитию пропускной способности либо по ремонту и модернизации существующей железнодорожной инфраструктуры.

Оценка целевых показателей комплексных инвестиционных проектов предусматривает вычисление результирующей мощности направлений и полигонов железнодорожной сети с применением сетевых оптимизационных моделей с количественной оценкой влияния фактора смежных систем на использование наличной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры путем имитационных расчетов.

Координация задач обеспечения предъявляемых объемов грузовых и пассажирских перевозок, необходимого объема реконструктивных работ по развитию железнодорожной инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности достигается автоматизированным прогнозом ресурсов сети и методами компромиссного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новое в расчетах интенсификации перевозок в условиях инфраструктурного развития полигонов сети железных дорог / М.А. Агеева [и др.] // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. (Шербинка, 26–27 августа 2021 г.). М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 4–12.
2. Бодюль В.И. Повышение ритмичности и эффективности транспортного производства на основе снижения внутрисуточной неравномерности грузовых перевозок на железных дорогах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. М., 2006. 318 с.
3. Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: Научный мир, 2015. 200 с.
4. Бородин А.Ф. Комплексные решения проблем развития инфраструктуры и перевозочных ресурсов // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 1 (68). С. 6–17.
5. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2022 г. № 545/р. 364 с. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования [Электронный ресурс]: утв. приказом Минтранса России от 18 июля 2018 г. № 266. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (дата обращения: 20.12.2021).
7. Кириллова С.Ю., Николаев К.Ю. К определению коэффициентов сжима пропускной способности участков железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 4. С. 230–238. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238>.
8. Методика классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р. URL: <https://base.garant.ru/73573702> (дата обращения: 22.12.2021).
9. Шарапов С.Н., Лялько М.В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.
10. Шухина Е.Е., Кисельгоф Г.К., Низовский А.В. Совершенствование систем интервального регулирования // Железнодорожный транспорт. 2021. № 12. С. 11–14.
11. Бородин А.Ф. Рациональное использование мощностей сортировочных комплексов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1993. № 8. С. 12–18.
12. Методика расчета планируемых и фактических показателей провозной и пропускной способностей железнодорожных магистралей и железнодорожных подходов к портам (в направлении портов и пограничных переходов) [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 июля 2020 г. № 1511/р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
13. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. № 2101-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2018. № 42 (Ч. II). Ст. 6480.

14. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 324 с.
15. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука, 1982. 288 с.
16. Бородин А.Ф., Панин В.В. Автоматизированная система прогноза ресурсов сети // Железнодорожный транспорт. 2017. № 4. С. 18–27.
17. Бородин А.Ф. Проблемы разработки генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2017. № 8. С. 34–42.
18. Некрашевич В.И., Бородин А.Ф., Мазанова И.С. Нормирование графиковых размеров движения грузовых поездов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1995. № 6–7–8. С. 8–14.
19. Бородин А.Ф. Автоматизация решения задач развития и использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов в Стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): материалы Восьмой науч.-техн. конф. (Москва, 21 ноября 2019 г.) / под ред. В.Г. Матюхина, В.И. Строгонова. М.: АО «НИИАС», 2019. С. 22–26.
20. Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А.Ф. Бородин [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2019. № 3. С. 12–22.
21. Козлов П.А., Колокольников В.С. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 3–7.
22. Колокольников В.С., Слободянюк И.Г. Технология макро моделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 48–51.
23. Колокольников В.С. Структурно-функциональная оптимизация полигонов на сети железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. Екатеринбург, 2020. 302 с.

REFERENCES

1. Ageeva M. A., Borodin A. F., Dmitriev E. O., et al. Novoe v raschetakh intensivatsii perevozok v usloviyakh infrastrukturnogo razvitiya poligonov seti zheleznykh dorog [New in calculations of the transportation intensification under the conditions of infrastructural development of railway network polygons]. Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon]. Procs. of I Int. science conf. (Shcherbinka, August 26–27, 2021). Moscow: VNIIZhT Publ.; 2021. P. 4–12. (In Russ.).
2. Bodul V. I. Povyshenie ritmichnosti i effektivnosti transportnogo proizvodstva na osnove snizheniya vnutrisutochnoy neravnomernosti gruzovykh perevozok na zheleznykh dorogakh [Improving the rhythm and efficiency of transport production based on the reduction of intraday irregularity of freight traffic on railways]. Dr. of Sci thesis: 05.22.08. Moscow; 2006. 318 p. (In Russ.).
3. Shenfel'd K. P., Sotnikov E. A. Razvitie metodov upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh [Development of methods for managing the transportation process in railway transport in modern conditions]. Moscow: Nauchnyy mir Publ.; 2015. 200 p. (In Russ.).
4. Borodin A. F. Kompleksnye resheniya problem razvitiya infrastruktury i perevozochnykh resursov [Complex solutions to the problems of development of infrastructure and transportation resources]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2017;15(1):6-17. (In Russ.).
5. Instruktziya po raschetu propusknoy i provoznoy sposobnostey zheleznykh dorog ОАО «RZhD» [Instructions for calculating the traffic and transportation capacities of the railway lines of Russian Railways]. Approved by the order of Russian Railways Company on

March 4, 2022 No. 545/r. 364 p. Access from the legal reference system ConsultantPlus. (In Russ.).

6. Metodika opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya [Methodology for determining the traffic and transportation capacities of the public railway transport infrastructure]. Approved by the order of the Ministry of Transport of Russia on July 18, 2018 No. 266. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (access date: 20.12.2021). (In Russ.).

7. Kirillova S. Yu., Nikolaev K. Yu. K opredeleniyu koeffitsientov s"ema propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog [To the determination of the capacity descheduling coefficients of railway sections]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2020;79(4):230–238. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238>. (In Russ.).

8. Metodika klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy OAO "RZhD" [Methodology for the classification and specialization of railway lines of Russian Railways]. Approved by the order of Russian Railways Company on January 13, 2020 No. 28/r. URL: <https://base.garant.ru/73573702> (access date: 22.12.2021). (In Russ.).

9. Sharapov S. N., Lya'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov [Classification and specialization of railway lines — the basis for optimizing operating costs]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2016;(7):50–60. (In Russ.).

10. Shukhina E. E., Kisel'gof G. K., Nizovskiy A. V. Sovershenstvovanie sistem interval'nogo regulirovaniya [Improving the systems of interval control]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2021;(12):11–14. (In Russ.).

11. Borodin A. F. Ratsional'noe ispol'zovanie moshchnostey sortirovochnykh kompleksov [Rational use of capacities of marshalling complexes]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1993;(8):12–18. (In Russ.).

12. Metodika rascheta planiruemyykh i fakticheskikh pokazateley provoznoy i propusknoy sposobnostey zheleznodorozhnykh magistralei i zheleznodorozhnykh podkhodov k portam (v napravlenii portov i pogranichnykh perekhodov) [Methodology for calculating the planned and actual indicators of the traffic and transportation capacities of railway lines and railway approaches to ports (in the direction of ports and border crossings)]. Approved by the order of Russian Railways Company on July 14, 2020 No. 1511/r. Access from the legal reference system ConsultantPlus. (In Russ.).

13. Kompleksnyy plan modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda [Comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation on September 30, 2018 No. 2101-r. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii = Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2018;42(II):Art.6480. (In Russ.).

14. Maynika E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh [Optimization algorithms for networks and graphs]. Moscow: Mir Publ.; 1981. 324 p. (In Russ.).

15. Mikhalevich V. S., Volkovich V. L. Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem [Computational methods for research and design of complex systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 288 p. (In Russ.).

16. Borodin A. F., Panin V. V. Avtomatizirovannaya sistema prognoza resursov seti [Automated system for forecasting railway network resources]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2017;(4):18–27. (In Russ.).

17. Borodin A. F. Problemy razrabotki general'noy skhemy razvitiya seti zheleznykh dorog OAO "RZhD" [Problems of creation of the general scheme for the development of the railway network of Russian Railways]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2017;(8):34–42. (In Russ.).

18. Nekrashevich V. I., Borodin A. F., Mazanova I. S. Normirovaniye grafikovykh razmerov dvizheniya gruzovykh poezdov [Rationing

of the schedule dimensions of the movement of freight trains]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1995;(6-7-8):8–14. (In Russ.).

19. Borodin A. F. Avtomatizatsiya resheniya zadach razvitiya i ispol'zovaniya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozochnykh resursov v Strategii tsifrovoy transformatsii OAO "RZhD" [Automation of solving problems of development and use of railway infrastructure and transportation resources in the Digital Transformation Strategy of Russian Railways]. Intel'lektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovaniye (ISUZhT-2019) [Intelligent Control Systems for Railway Transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019)]. Materials of the VIII scientific and technical conf. (Moscow, November 21, 2019). Moscow: NIIAS Publ.; 2019. P. 22–26. (In Russ.).

20. Borodin A. F., Panin V. V., Prokof'eva E. S., Saybatalov R. F. Algoritmicheskie resheniya zadach effektivnogo ispol'zovaniya i razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozochnykh resursov [Algorithmic solutions for the problems of efficient use and development of railway infrastructure and transportation resources]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" = Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2019;(3):12–22. (In Russ.).

21. Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S. Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya bol'shikh poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Structural and functional optimization of large polygons of railway transport]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2018;3(58):3–7. (In Russ.).

22. Kolokol'nikov V. S., Slobodyanyuk I. G. Tekhnologiya makro-modelirovaniya poligonov [Technology of macro-modeling of polygons]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2019;3(62):48–51. (In Russ.).

23. Kolokol'nikov V. S. Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya poligonov na seti zheleznykh dorog [Structural and functional optimization of polygons on the railway network]. Dr. of Sci. thesis: 05.22.08. Ekaterinburg; 2020. 302 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Федорович БОРОДИН,

д-р техн. наук, профессор, начальник отдела технологического обеспечения автоматизированных систем, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 279058, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Виталий Владимирович ПАНИН,

канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); доцент, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 403717, <https://orcid.org/0000-0002-3568-0961>

Марина Андреевна АГЕЕВА,

старший научный сотрудник, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24), Author ID: 1154606, <https://orcid.org/0000-0002-7412-5661>

Андрей Юрьевич СОКОЛОВ,

заместитель заведующего отделением эксплуатации железных дорог и взаимодействия транспортных систем, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24), Author ID: 976205, <https://orcid.org/0000-0003-3498-5015>

Светлана Юрьевна КИРИЛЛОВА,

ведущий инженер, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24),
Author ID: 900481, <https://orcid.org/0000-0002-2747-4463>

Егор Олегович ДМИТРИЕВ,

инженер 1 категории, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 1052780, <https://orcid.org/0000-0002-3972-604X>

Артем Андреевич КРАВЧЕНКО,

инженер, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1154605, <https://orcid.org/0000-0002-9130-0716>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Technological Support of Automated Systems, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Head of the Department of Management of operational work and safety in transport, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.),
Author ID: 279058, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Vitaliy V. PANIN,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy General Director, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Associate Professor, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 403717, <https://orcid.org/0000-0002-3568-0961>

Marina A. AGEEVA,

Senior Researcher, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.),
Author ID: 1154606, <https://orcid.org/0000-0002-7412-5661>

Andrey Yu. SOKOLOV,

Deputy Head of the Department of Railway Operation and Interaction of Transport Systems, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.),
Author ID: 976205, <https://orcid.org/0000-0003-3498-5015>

Svetlana Yu. KIRILLOVA,

Leading Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.),
Author ID: 900481, <https://orcid.org/0000-0002-2747-4463>

Egor O. DMITRIEV,

1st Category Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1052780, <https://orcid.org/0000-0002-3972-604X>

Artem A. KRAVCHENKO,

Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1154605, <https://orcid.org/0000-0002-9130-0716>

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Федорович БОРОДИН. Постановка цели, выбор структуры и методологии исследования (15%).

Виталий Владимирович ПАНИН. Обоснование применения методов компромиссного управления (15%).

Марина Андреевна АГЕЕВА. Создание алгоритма расчета целевых показателей комплексных инвестиционных проектов (10%).

Андрей Юрьевич СОКОЛОВ. Исследование пропускной способности участков и результирующей перевозочной мощности полигонов сети (15%).

Светлана Юрьевна КИРИЛЛОВА. Исследование съема пропускной способности поездами различных категорий (15%).

Егор Олегович ДМИТРИЕВ. Исследование вариантных технологических режимов и сценарное моделирование освоения перевозок (15%).

Артем Андреевич КРАВЧЕНКО. Исследование мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях истощения инфраструктурных и графиковых ресурсов (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN. Goal statement, choosing the structure and methodology of the study (15%).

Vitaliy V. PANIN. Substantiation of the application of compromise management methods (15%).

Marina A. AGEEVA. Creation of an algorithm for calculating the target indicators of complex investment projects (10%).

Andrey Yu. SOKOLOV. Study of the traffic capacity of the sections and the resulting transportation capacity of the network polygons (15%).

Svetlana Yu. KIRILLOVA. Study of capacity removal by trains of various categories (15%).

Egor O. DMITRIEV. Study of variant technological modes and scenario modelling of transportation development (15%).

Artem A. KRAVCHENKO. Study of measures to influence the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources (15%).

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 27.01.2022, первая рецензия получена 29.01.2022, вторая рецензия получена 03.03.2022, принята к публикации 25.05.2022.

The article was submitted 27.01.2022, first review received 29.01.2022, second review received 03.03.2022, accepted for publication 25.05.2022.



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 629.463.6:621.642:658.7

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178

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



КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ МАССОВЫХ ГРУЗОВ

С. П. Вакуленко¹, М. В. Роменская¹✉,
К. А. Калинин¹, К. И. Шведин²

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

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях идущей опережающими темпами контейнеризации грузовых перевозок на железнодорожном транспорте становится все более актуальным вопрос поиска новых грузопотоков, пригодных к перевозке в контейнерах или в другой интермодальной транспортной таре на приемлемых условиях для перевозчика и грузоотправителя. Из-за фиксированного размера крупнотоннажного контейнера перевозка в нем не всегда отвечает запросам грузоотправителей по причинам неудовлетворительной грузоподъемности, объема кузова и тарифных условий. В статье исследуется вопрос технико-экономической эффективности использования железнодорожного транспорта при применении различных типов подвижного состава и соответствующих им логистических технологий в рамках поиска новых направлений контейнеризации грузопотоков.

Материалы и методы. На примере перевозок насыпных грузов, слабо подверженных контейнеризации, проведен анализ эффективности использования подвижного состава в зависимости от рода перевозимого насыпного груза (плотности груза). Для сравнения были взяты как распространенные типы подвижного состава (конвенционный и полувагон с повышенной нагрузкой на ось), так и достаточно редко используемые типы подвижного состава (сочлененный полувагон с повышенной нагрузкой на ось, съемный железнодорожный кузов, контейнеры open top и специализированный bulk-контейнер).

Результаты. Для каждого типа подвижного состава построены графики, показывающие эффективность использования потенциала железнодорожного транспорта, выраженную через объем перевозимого груза на погонный метр вагона и через использование полезного объема самого подвижного состава. Сравнение доказало, с одной стороны, очевидный тезис о лучшей приспособленности полувагонов к перевозкам насыпных грузов, а с другой стороны, показало существенное ухудшение условий перевозки насыпных грузов в крупнотоннажных контейнерах.

Обсуждение и заключение. Использование инновационной системы съемных железнодорожных кузовов демонстрирует средние показатели в общем ранге, что свидетельствует о достаточном потенциале для внедрения данной логистической технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, подвижной состав, вагон, грузоподъемность, кузов, сменный кузов, съемный кузов, контейнер, контейнерные перевозки, логистика

Для цитирования: Вакуленко С.П., Роменская М.В., Калинин К.А., Шведин К.И. Комплексный анализ эффективности использования современного подвижного состава при перевозках массовых грузов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 170–178. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178>.

✉ avantes7@yandex.ru (М. В. Роменская)

© Вакуленко С. П., Роменская М. В.,
Калинин К. А., Шведин К. И., 2022

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.463.6:621.642:658.7

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178

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



COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE MODERN ROLLING STOCK EFFICIENCY IN BULK CARGO TRANSPORTATION

Sergey P. Vakulenko¹, Mariya V. Romenskaya¹✉,
Kirill A. Kalinin¹, Konstantin I. Shvedin²

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Under the conditions of increasing containerisation of railway freight traffic, the problem of finding new cargo flows suitable for transportation of freight containers or other types of intermodal freight containers on acceptable terms for both the carrier and the consignor is becoming increasingly important. Being of a fixed size, large-capacity containers can not always meet the demands of consignors due to insufficient carrying capacity, body volume and tariff conditions. The article examines the technical and economic efficiency of railway transport using various types of rolling stock and corresponding logistics technologies in the search for new areas for containerisation of cargo flows.

Materials and methods. Using bulk transportation, which is weakly subject to containerisation, as example, the authors carried out an analysis of the efficiency of rolling stock depending on the type of transported bulk freight (freight density). The comparison was performed both between common types of rolling stock (conventional and increased axle load gondola) and rather rarely used types of rolling stock (articulated gondola with increased axle load, demountable railway body, open top containers and specialised bulk containers).

Results. Graphs have been plotted showing the efficiency of using each type of rolling stock, expressed through the volume of transported freight per running meter of the car and through the use of the useful volume of the rolling stock itself. The comparison proved, firstly, the obvious thesis about the better suitability of gondola cars for the transportation of bulk freight, and secondly, it showed a significant deterioration in the bulk freight transportation conditions for large-capacity containers.

Discussion and conclusion. The innovative system of demountable railway bodies demonstrates average results in the overall ranking, which indicates sufficient potential for the implementation of this logistics technology.

KEYWORDS: railway transport, rolling stock, car, carrying capacity, body, swap body, demountable body, container, containerised shipment, logistics

For citation: Vakulenko S. P., Romenskaya M. V., Kalinin K. A., Shvedin K. I. Comprehensive analysis of the modern rolling stock efficiency in bulk cargo transportation. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):170-178. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-170-178>.

Введение. Перевозки грузов в крупнотоннажных контейнерах на сети железных дорог ОАО «РЖД» находятся в стадии активного роста. Например, с 2015 по 2021 г. объемы перевозок контейнеров увеличились с 3 млн условных двадцатифутовых контейнеров (ДФЭ) [1] до 6,5 млн. На железнодорожном транспорте находят реализацию две ключевые тенденции последних десятилетий: переход на контейнерные отправки грузов, перевозимых в настоящее время в конвенциональном железнодорожном подвижном составе, а также индуцирование спроса на грузовые перевозки железнодорожным транспортом за счет повышения качества логистических услуг при использовании крупнотоннажных контейнеров. Вторая тенденция также реализуется в виде переключения на железнодорожный транспорт части грузопотоков, обслуживаемых в настоящее время автомобильным транспортом.

Контейнерный бизнес на железнодорожном транспорте развивается в парадигме обслуживания достаточно крупных (разовых или регулярных) грузопотоков во внутреннем или в экспортно-импортном сообщении. Контейнеризации подвергаются все новые и новые грузопотоки. По оценкам участников рынка транспортно-логистических услуг, перевозки в универсальных контейнерах были апробированы на примере практически всех видов грузов, которые по массогабаритным и физическим параметрам могут быть размещены в контейнере с упаковкой или без упаковки.

Контейнеры оказались наиболее удобным транспортным продуктом для грузоотправителей при обслуживании импортных перевозок товаров народного потребления, полуфабрикатов и других немассовых категорий грузов. Также активное применение контейнеров в смешанном железнодорожно-водном сообщении показывает удобство данной транспортной тары при необходимости использования нескольких видов транспорта. Определенную популярность контейнерные перевозки приобретают во внутрироссийском сообщении между крупнейшими городами на расстоянии свыше 3000 км. Однако из-за объективных причин технико-экономического характера ниша эффективного использования интермодальной транспортной тары на железнодорожном транспорте до настоящего момента заполнена не до конца. В эту нишу входят не только крупнотоннажные контейнеры, но и такие типы транспортной тары, как среднетоннажные контейнеры, сменные автомобильные кузова (контентальные контейнеры), съемные железнодорожные кузова и контейнеры [2–7].

Постановка проблемы эффективности и универсальности подвижного состава в современных условиях. При выборе типа подвижного состава для перевозки груза во внутреннем или экспортно-

импортном сообщении грузоотправителями сравниваются следующие параметры:

- фактическая стоимость доставки груза, включая стоимость привлечения подвижного состава, тарифы за перевозку и все виды дополнительных сборов;
- наличие компетенций и оборудования для работы с каждым типом подвижного состава у грузоотправителя и грузополучателя;
- наличие (доступность) подвижного состава и срок его заадресации к месту погрузки;
- сохранность груза при перевозке.

Одним из объективных критериев, влияющих на привлекательность использования того или иного подвижного состава при перевозках с использованием инфраструктуры ОАО «РЖД», является эффективность использования возможностей железнодорожного транспорта по объему партии перевозимого груза (эффективность использования железнодорожного габарита) и по грузоподъемности вагонов (эффективность использования погонной нагрузки). Так как железнодорожный транспорт в сравнении с автомобильным имеет преимущество по этим параметрам, недоиспользование такого потенциала приводит к снижению общей эффективности перевозочного процесса. Эти параметры прямо или косвенно влияют на затраты грузоотправителей через тариф, стоимость привлечения вагонов и контейнеров, величину фактических затрат ОАО «РЖД» на перевозочную деятельность и другие факторы, а следовательно, и на предпочтения к использованию того или иного типа подвижного состава, и даже на общую привлекательность железнодорожного транспорта.

В реальных условиях работы железнодорожного транспорта из-за несбалансированности грузопотоков массовых грузов возникает интерес грузоотправителей к такой заведомо менее эффективной перевозочной технологии, как перевозка контейнеров в полувагонах [8–10]. Подобная тенденция показывает интерес транспортного рынка к появлению, с одной стороны, достаточно эффективного (вместительного) подвижного состава, а с другой стороны, владельцам подвижного состава хотелось бы иметь наиболее универсальный подвижной состав, пригодный для коммерческого использования в перевозках любых типов грузов. Как правило, эти требования взаимоисключающие, и необходим поиск компромиссных решений, которые удовлетворят всех участников перевозочного процесса, начиная от производителей вагонов и заканчивая стивидорными компаниями, обслуживающими грузопотоки в портах.

Усилия вагоностроительного сектора последние годы были направлены преимущественно в сторону повышения надежности вагонов, увеличения полезного объема кузовов и повышения грузоподъемности

(главным образом за счет повышения нагрузки на ось) [11] при достаточно консервативном подходе к конструкциям и использованию типоразмеров полувагонов, крытых вагонов, вагонов-хопперов и цистерн. Максимизировать полезность использования железнодорожного транспорта при контейнерных перевозках получилось путем перехода на длиннобазные фитинговые вагоны-платформы. Данную тенденцию в вагоностроении продолжит переход на трехосные тележки [12], что позволит еще более увеличить полезную погонную нагрузку и перевезти больший объем грузов тем же количеством поездов.

Сравнение эффективности использования различных типов подвижного состава при перевозках насыпных грузов. Проведем сравнение эффективности использования различных типов подвижного состава (и соответствующих им логистических схем) на примере сегмента, слабо охваченного контейнеризацией, — сегмента перевозки насыпных грузов. Такие грузы активно перевозятся во всех видах сообщений, и величина партии отправки колеблется от повагонной и групповой до регулярной маршрутизированной отправки.

При сравнении не будет рассматриваться тарифная составляющая, так как величина тарифа не всегда отражает фактическую эффективность перевозки для участников процесса. Для анализа приняты упомянутые выше параметры — длина кузова, грузоподъемность подвижного состава (для анализа эффективности использования погонной нагрузки) и габариты подвижного состава (для анализа эффективности использования железнодорожного габарита).

Для каждого типа грузового подвижного состава (вагонов и интермодальной транспортной тары) необходимо построить кривую зависимости (график) эффективности его использования при перевозке насыпных грузов разной плотности. Идеальным является такое состояние, при котором одновременно полностью используются как объем кузова, так и грузоподъемность подвижного состава. Соответственно, чем больше кузов и грузоподъемность, тем более универсальным является вагон или транспортная единица на нем, а следовательно, более эффективным является подвижной состав. Подвижной состав с малым размером кузова и конкурентоспособной грузоподъемностью может оказаться привлекательным только для перевозки грузов с большой плотностью, и наоборот: подвижной состав с большим объемом кузова и малой грузоподъемностью может быть эффективным и привлекателен для грузоотправителей только при перевозках легковесных грузов с меньшей плотностью.

Общий вид кривой эффективности использования подвижного состава в зависимости от рода перевозимого груза приведен на рис. 1.

Для дальнейшего исследования применимости различных типов транспортной тары в условиях внедрения современных технологий грузовых перевозок с использованием конвенциональной и интермодальной тары на примере перевозок насыпных грузов принимается: полувагон с нагрузкой на ось 23,5 т, открытый 20-футовый контейнер без крыши — open top (типы ICC, IC, ГОСТ Р 53350—2009 (ИСО 668:1995) «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса»), открытый 40-футовый контейнер open top (типы 1BBB, 1BB, 1B), специализированный bulk-контейнер для насыпных грузов (эквивалент типов ICC и IC), полувагон с повышенной допустимой нагрузкой на ось 25 т, сочлененный полувагон с нагрузкой на ось 25 т и модульный подвижной состав с применяемой технологией съемных кузовов (на примере разработок «Объединенной вагонной компании» — ОВК). Основные эксплуатационные характеристики данных типов вагонов и соответствующих им типов транспортной тары приведены в табл. 1. Рассмотренные типы тары и вагонов, применяемые для перевозки насыпных грузов с различной плотностью, исследуем по следующим количественным и качественным характеристикам:

- используемый объем кузова подвижного состава $\alpha V_{п.с.}^i, \text{м}^3$;

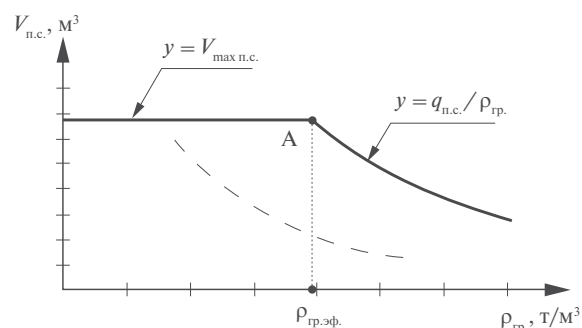


Рис. 1. Общий вид кривой эффективности использования подвижного состава в зависимости от рода перевозимого груза: $V_{\max \text{ п.с.}}$ — максимальный объем груза, принимаемый к перевозке в рассматриваемом типе подвижного состава, м^3 ; $\rho_{\text{гр.}}$ — плотность груза, принимаемого к перевозке, т/м^3 ; $\rho_{\text{гр.эф.}}$ — плотность груза, при которой обеспечивается предельная эффективность использования подвижного состава по объему и грузоподъемности, т/м^3 ; $q_{\text{п.с.}}$ — предельная нагрузка подвижного состава, т ; А — точка наиболее эффективного использования подвижного состава с максимальной нагрузкой по объему и массе перевозимого груза

Fig. 1. General view of the efficiency curve for the use of rolling stock depending on the type of trailing load: $V_{\max \text{ п.с.}}$ — maximum volume of freight accepted for transportation for the type of rolling stock under consideration, m^3 ; $\rho_{\text{гр.}}$ — density of freight accepted for transportation, t/m^3 ; $\rho_{\text{гр.эф.}}$ — load density ensuring peak efficiency of rolling stock utilisation in terms of volume and carrying capacity, t/m^3 ; $q_{\text{п.с.}}$ — maximum load of the rolling stock, t ; А — the point of the most efficient use of rolling stock with the maximum load in terms of volume and weight of the trailing load

Таблица 1

Исходные данные для анализа эффективности использования объема кузова подвижного состава

Table 1

Initial data for the analysis of the rolling stock body volume efficiency

Тип подвижного состава	Полезный объем кузова, м ³	Количество тары на единицу подвижного состава	Абсолютный объем кузова, м ³	Относительный объем кузова, м ³	Грузоподъемность, т	Длина (по осям автоцепок), м	Масса на погонный метр подвижного состава, т/м
Контейнер open top 20-футовый ICC, 1C	32,45	2	64,9	0,4160	43,12	14,62	2,95
Контейнер open top 40-футовый 1BBB, 1BB, 1B	66,7	1	66,7	0,4276	31,57	14,62	2,16
Контейнер bulk-cont 20-футовый ICC, 1C	32,79	2	65,58	0,4204	48,98	14,62	3,35
Полувагон 25 т/ось	88	1	88	0,5641	77	13,92	5,53
Полувагон сочлененный 25 т/ось	142	1	142	0,9103	114,5	19,54	5,86
Полувагон 23,5 т/ось	76	1	76	0,4872	69	13,92	4,96
Съемный кузов ОВК на сочлененной платформе	52	3	156	1,0000	106,5	19,54	5,45

- используемый объем кузова подвижного состава на погонный метр $\beta V_{п.с.}^i$, м³/м;
- относительное использование полезного объема кузова подвижного состава при перевозке $\gamma V_{п.с.}^i$, %;
- относительное использование объема кузова подвижного состава на погонный метр при перевозке $\delta V_{п.с.}^i$, %/м.

Исследуемые параметры в соответствии с рис. 1 будут состоять из двух пересекающихся функций:

а) линейной — отражающей использование подвижного состава по объему;

б) гиперболической — отражающей использование подвижного состава по допустимой грузоподъемности.

Для параметра объема транспортной тары параметр $\alpha V_{п.с.}^i$ определим как

$$\begin{cases} \alpha V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = V_{п.с.}^i & \text{при } \rho_{гр.}^k < \rho_{гр.эф.}; \\ \alpha V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = \frac{q_{п.с.}^i}{\rho_{гр.}^k} & \text{при } \rho_{гр.}^k > \rho_{гр.эф.}, \end{cases} \quad (1)$$

где $V_{п.с.}^i$ — предельная вместимость рассматриваемого i -го подвижного состава, м³; $q_{п.с.}^i$ — предельная загрузка рассматриваемого i -го подвижного состава, т; $\rho_{гр.}^k$ — плотность k -го типа груза, принимаемого к перевозке, т/м³; $\rho_{гр.эф.}$ — плотность груза, при которой обеспечивается предельная эффективность использования подвижного состава по объему и грузоподъемности, т/м³.

Для определения $\rho_{гр.эф.}$ достаточно рассчитать точку пересечения полученных функциональных зависимостей, т. е. приравнять части уравнения,

тогда после выполнения соответствующих преобразований получим

$$\rho_{гр.эф.} = \frac{q_{п.с.}^i}{V_{п.с.}^i}. \quad (2)$$

При определении эффективности использования подвижного состава целесообразно рассчитать приведенную абсолютную нагрузку на погонный метр:

$$\begin{cases} \beta V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = \frac{V_{п.с.}^i}{l_{п.с.}^i} & \text{при } \rho_{гр.}^k < \rho_{гр.эф.}; \\ \beta V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = \frac{q_{п.с.}^i}{\rho_{гр.}^k l_{п.с.}^i} & \text{при } \rho_{гр.}^k > \rho_{гр.эф.}, \end{cases} \quad (3)$$

где $l_{п.с.}^i$ — длина используемого подвижного состава по осям автосцепок, м.

Полученные зависимости абсолютных значений используемого объема для исследуемых типов подвижного состава приведены на рис. 2 и 3.

Для общего представления об эффективности подвижного состава кроме абсолютных показателей используемого объема кузова необходимо определить показатели его относительного использования в зависимости от $\rho_{гр.}^k$ (формулы 4, 5):

$$\gamma V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = \frac{\alpha V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k)}{V_{п.с.}^{i,\%} \max(V_{п.с.}^i)} \cdot 100; \quad (4)$$

$$\gamma V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k) = \frac{\alpha V_{п.с.}^i(\rho_{гр.}^k)}{V_{п.с.}^{i,\%} \max(V_{п.с.}^i) l_{п.с.}^i} \cdot 100. \quad (5)$$

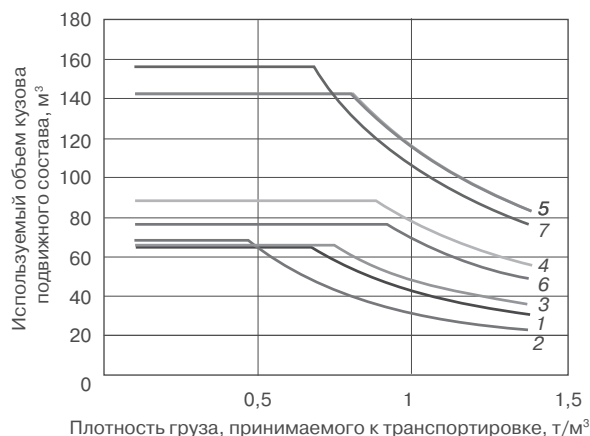


Рис. 2. Кривые зависимости используемого объема кузова подвижного состава от рода груза:
1 — контейнер open top 20-футовый; 2 — контейнер open top 40-футовый; 3 — контейнер bulk-cont 20-футовый; 4 — полувагон 25 т/ось; 5 — полувагон сочлененный 25 т/ось; 6 — полувагон 23,5 т/ось; 7 — съемный кузов ОВК

Fig. 2. Dependence curves of the used volume of the rolling stock body on the freight type:
1 — 20-foot open top container; 2 — 40-foot open top container; 3 — 20-foot bulk container; 4 — gondola car 25 t/axis; 5 — articulated gondola car 25 t/axis; 6 — gondola car 23.5 t/axis; 7 — UWC demountable body

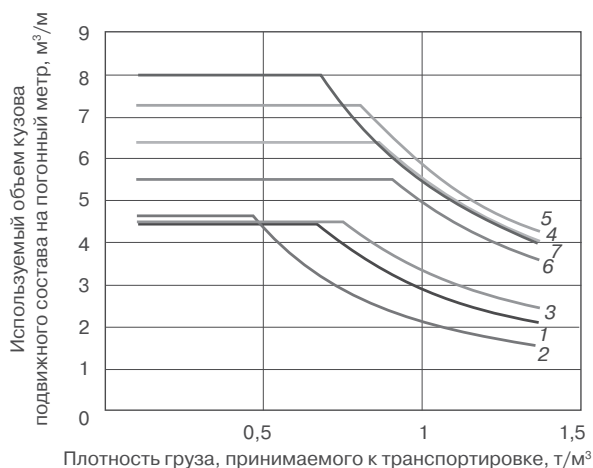


Рис. 3. Кривые зависимости используемого объема кузова подвижного состава на погонный метр от рода груза:
1 — контейнер open top 20-футовый; 2 — контейнер open top 40-футовый; 3 — контейнер bulk-cont 20-футовый; 4 — полувагон 25 т/ось; 5 — полувагон сочлененный 25 т/ось; 6 — полувагон 23,5 т/ось; 7 — съемный кузов ОВК

Fig. 3. Dependence curves of the used volume of the rolling stock body per running meter on the freight type:
1 — 20-foot open top container; 2 — 40-foot open top container; 3 — 20-foot bulk container; 4 — gondola car 25 t/axis; 5 — articulated gondola car 25 t/axis; 6 — gondola car 23.5 t/axis; 7 — UWC demountable body

На рис. 4 и 5 представлены кривые зависимости относительного использования объема для тех же типов подвижного состава.

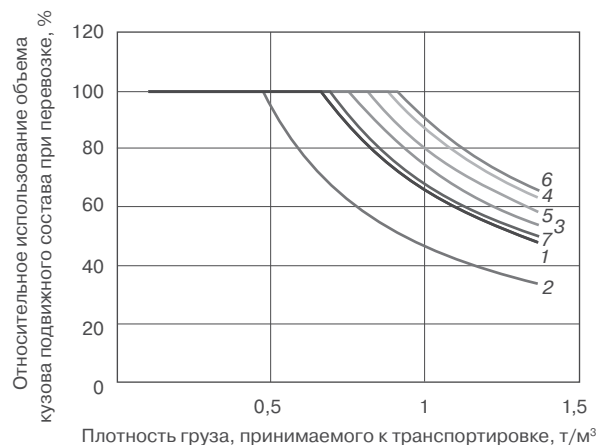


Рис. 4. Кривые зависимости относительного использования объема кузова подвижного состава от рода груза:
1 — контейнер open top 20-футовый; 2 — контейнер open top 40-футовый; 3 — контейнер bulk-cont 20-футовый; 4 — полувагон 25 т/ось; 5 — полувагон сочлененный 25 т/ось; 6 — полувагон 23,5 т/ось; 7 — съемный кузов ОВК

Fig. 4. Dependence curves of the relative use of the volume of the rolling stock body on the freight type:
1 — 20-foot open top container; 2 — 40-foot open top container; 3 — 20-foot bulk container; 4 — gondola car 25 t/axis; 5 — articulated gondola car 25 t/axis; 6 — gondola car 23.5 t/axis; 7 — UWC demountable body

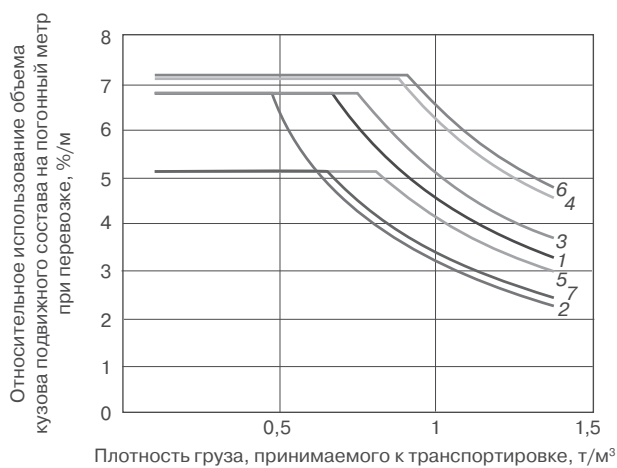


Рис. 5. Кривые зависимости относительного использования объема кузова подвижного состава на погонный метр от рода груза:
1 — контейнер open top 20-футовый; 2 — контейнер open top 40-футовый; 3 — контейнер bulk-cont 20-футовый; 4 — полувагон 25 т/ось; 5 — полувагон сочлененный 25 т/ось; 6 — полувагон 23,5 т/ось; 7 — съемный кузов ОВК

Fig. 5. Dependence curves of the relative use of the volume of the rolling stock body per running meter on the freight type:
1 — 20-foot open top container; 2 — 40-foot open top container; 3 — 20-foot bulk container; 4 — gondola car 25 t/axis; 5 — articulated gondola car 25 t/axis; 6 — gondola car 23.5 t/axis; 7 — UWC demountable body

Полученные результаты сведем в табл. 2 для анализа и ранжирования эффективности использования рассмотренных типов подвижного состава.

Таблица 2

Ранжирование эксплуатационной эффективности использования
современных типов подвижного состава по исследуемым параметрам при перевозках насыпных грузов

Table 2

Operating efficiency ranking
of the rolling stock modern types according to the studied parameters in the bulk freight transportation

Тип подвижного состава	Ранжирование по расчетным параметрам				Среднее значение ранга
	Используемый объем кузова	Используемый объем кузова на погонный метр	Относительное использование полезного объема кузова при перевозке	Относительное использование объема кузова на погонный метр при перевозке	
Контейнер open top 20-футовый 1CC, 1C	6	6	6	4	5,5
Контейнер open top 40-футовый 1BBB, 1BB, 1B	7	7	7	7	7
Контейнер bulk-cont 20-футовый 1CC, 1C	5	5	4	3	4,25
Полувагон 25 т/ось	3	2	2	2	2,25
Полувагон сочлененный 25 т/ось	1	1	3	5	2,5
Полувагон 23,5 т/ось	4	4	1	1	2,5
Съемный кузов ОВК на сочлененной платформе	2	3	5	6	4

Так, наиболее универсальным типом подвижного состава при различных измерителях эффективности его использования является полувагон с повышенной нагрузкой на ось 25 т. Приближенные к нему результаты продемонстрировали более специализированная модель сочлененного полувагона и полувагон с нагрузкой на ось 23,5 т. Среди интермодальной транспортной тары наилучшие показатели продемонстрировали съемный кузов (по технологии ОВК) и специализированный bulk-контейнер, наихудшие результаты по эксплуатационным параметрам показали 20- и 40-футовый контейнеры open top. Экономический эффект от менее эффективного использования интермодальной транспортной тары компенсируется дополнительными доходами и экономией в случае организации перевозок с несколькими перевалками и использованием нескольких видов транспортных средств. Использование любых типов интермодальной транспортной тары в системе ускоренных грузовых перевозок [13, 14] также позволит увеличить нишу эффективного использования таких типов транспортной тары на железной дороге.

Заключение и обсуждение. Результаты проведенного анализа показали, с одной стороны, очевидность тезиса о лучшей приспособленности полувагонов к перевозкам насыпных грузов, а с другой — существенное ухудшение условий перевозки насыпных грузов в крупнотоннажных контейнерах. Использо-

вание инновационной системы съемных железнодорожных кузовов демонстрирует средние показатели в общем ранге, что свидетельствует о достаточном потенциале для внедрения данной логистической технологии: такой подвижной состав показывает наилучшую универсальность на железнодорожном транспорте в перевозках различных номенклатур грузов.

В условиях обслуживания железными дорогами значительных по объемам и стабильных по структуре грузопотоков насыпных грузов (уголь, руды и другие аналогичные грузы) сфера применения интермодальной транспортной тары в обслуживании перевозок насыпных грузов и других грузов первого передела невелика. Использование конвенционального железнодорожного подвижного состава все равно остается более эффективным при больших грузопотоках и больших расстояниях перевозки. Использование интермодальной транспортной тары будет особенно эффективным при перевозках на расстояния меньше 1000 км, смерзающихся грузов зимой и небольших партий грузов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов в контейнерах и порожних контейнеров [Электронный ресурс]: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 18 декабря 2019 г. № 405: зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 марта 2020 г. № 57861).

URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003270044?index=8&rangeSize=1> (дата обращения: 14.03.2022).

2. Развитие перевозок грузов в интермодальных транспортных грузовых единицах / С.А. Виноградов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2022. № 2. С. 7–11.

3. Перспективы использования новых интермодальных транспортных грузовых единиц / А.В. Хомов [и др.] // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. (Шербинка, 26–27 августа 2021 г.). М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 200–208.

4. Хомов А.В., Дрейбанд Д.В. Предложение использования съемного кузова при организации комбинированных перевозок с участием железнодорожного и внутреннего водного транспорта // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика: материалы II Нац. науч.-образоват. конф. (Санкт-Петербург, 21 октября 2021 г.) / Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. СПб.: СПбГЭУ, 2021. С. 272–281.

5. Хомов А.В. Использование съемного кузова на первой и последней миле // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика: материалы I Нац. науч.-образоват. конф. (Санкт-Петербург, 20 октября 2020 г.) / Санкт-Петербургский гос. экон. ун-т. СПб.: СПбГЭУ, 2020. С. 139–146.

6. Куренков П.В., Астафьев А.В., Кизимиров М.В. Вне-транспортный эффект контейнерных перевозок // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2016. № 5. С. 23–29.

7. Куренков П.В., Астафьев А.В., Кизимиров М.В. Экономическая оценка развития регулярного контейнерного сообщения на территории РФ // Экономика железных дорог. 2016. № 4. С. 60–64.

8. Перевозка крупнотоннажных контейнеров / С.П. Вакулenco [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 5. С. 14–18.

9. Роменский Д.Ю., Калинин К.А., Астафьев А.В. Логистика интермодальных перевозок крупнотоннажных контейнеров // Логистика: современные тенденции развития: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 8–9 апреля 2021 г.). СПб.: Гос. ун-т морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, 2021. С. 69–80.

10. Вакулenco С.П., Евреенова Н.Ю., Прокофьев М.Н. Взаимодействие видов транспорта в единой транспортной системе: учеб. пособие / Российский университет транспорта (МИИТ). М.: РУТ (МИИТ), 2021. 121 с.

11. Мирошниченко О.Ф., Огинская А.Е. Методология расчета финансового результата для владельца инфраструктуры от повышения провозной способности направления при перевозках в вагонах повышенной грузоподъемности // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, №1. С. 33–40. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-33-40>.

12. Левин А.Б., Смольянинов А.В., Павлюков А.Э. Разработка технического облика трехосной тележки грузовых вагонов // Инновационный транспорт. 2015. Т. 15, № 1. С. 49–58.

13. Перспективы развития ускоренных грузовых перевозок / С.А. Виноградов [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 4. С. 10–15.

14. Насыбуллин А.М. Размещение грузовых мест в составе поездов постоянного формирования // Экономика железных дорог. 2021. № 3. С. 67–75.

[On approval of the Rules for the carriage of goods in containers and empty containers by railways. Decree No. 405 of the Ministry of Transportation of Russian Federation on December 18, 2019]. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on March 27, 2020 No. 57861. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003270044?index=8&rangeSize=1> (access date: 14.03.2022). (In Russ.).

2. Vinogradov S.A., Mekhedov M.I., Khomov A.V., et al. Razvitie perevozok грузов v intermodal'nykh transportnykh грузовых единицах [Development of cargo transportation in intermodal transport cargo units]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2022;(2):7-11. (In Russ.).

3. Khomov A.V., Shvedin K.I., Khomova N.A., et al. Perspektivy ispol'zovaniya novykh intermodal'nykh transportnykh грузовых единиц [Prospects for the use of new intermodal transport cargo units]. *Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon]*. Procs. of I Int. scientific conf. (Shcherbinka, August 26–27, 2021). Moscow: VNIIZhT Publ.; 2021. P. 200–208. (In Russ.).

4. Khomov A.V., Dreyband D.V. Predlozhenie ispol'zovaniya s'emnogo kuzova pri organizatsii kombinirovannykh perevozok s uchastiem zheleznodorozhnogo i vnutrennego vodnogo transporta [Proposal for the use of a swap body in the organization of combined transportation with the participation of railway and inland water transport]. *Logistika: forsayt-issledovaniya, professiya, praktika [Logistics: foresight research, profession, practice]*. Procs. of II scientific and educational conf. (St. Petersburg, October 21, 2021). St. Petersburg: SPbGEU Publ.; 2021. P. 272–281. (In Russ.).

5. Khomov A.V. Ispol'zovanie s'emnogo kuzova na pervoy i posledney mile [The use of a swap body on the first and last mile]. *Logistika: forsayt-issledovaniya, professiya, praktika [Logistics: foresight research, profession, practice]*. Procs. of I scientific and educational conf. (St. Petersburg, October 20, 2020). St. Petersburg: SPbGEU Publ.; 2020. P. 139–146. (In Russ.).

6. Kurenkov P.V., Astaf'ev A.V., Kizimirov M.V. Vnetransportnyy effekt konteynernykh perevozok [Out-of-transport effect of container freighting]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Collection of scientific articles*. 2016;(5):23-29. (In Russ.).

7. Kurenkov P.V., Astaf'ev A.V., Kizimirov M.V. Ekonomicheskaya otsenka razvitiya regul'yarnogo konteylernogo soobshcheniya na territorii RF [Economic assessment of the development of regular container freighting on the territory of the Russian Federation]. *Ekonomika zheleznikh dorog = Railway Economics*. 2016;(4):60-64. (In Russ.).

8. Vakulenko S.P., Kurenkov P.V., Romenskiy D.Yu., et al. Perevozka krupnotonnazhnykh konteynerov [Transportation of large-tonnage containers]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2021;(5):14-18. (In Russ.).

9. Romenskiy D.Yu., Kalinin K.A., Astaf'ev A.V. Logistika intermodal'nykh perevozok krupnotonnazhnykh konteynerov [Logistics of intermodal transit of large-tonnage containers]. *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya [Logistics: modern development trends]*. Procs. of scientific-practical. conf. (St. Petersburg, April 8–9, 2021). St. Petersburg: State University of Sea and River Fleet named after adm. S.O. Makarov Publ.; 2021. P. 69–80. (In Russ.).

10. Vakulenko S.P., Evreenova N.Yu., Prokof'ev M.N. Vzaimodeystvie vidov transporta v edinoy transportnoy sisteme [Interaction of modes of transport in a single transport system]. *Textbook*. Moscow: RUT (MIIT) Publ.; 2021. 121 p. (In Russ.).

11. Miroshnichenko O.F., Oginskaya A.E. Metodologiya rascheta finansovogo rezul'tata dlya vladel'tsa infrastruktury ot povysheniya provoznoy sposobnosti napravleniya pri perevozках v vagonakh povyshennoy gruzopod'emnosti [Methodology for calculating financial result for the owner of the infrastructure from increasing carrying capacity

REFERENCES

1. Ob utverzhdenii Pravil perevozok zheleznodorozhnym transportom грузов v konteynerakh i porozhnykh konteynerov: prikaz Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 18 dekabrya 2019 g. № 405

of the direction during operation in cars with increased capacity]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2019;78(1):33-40. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-33-40>. (In Russ.).

12. Levin A. B., Smol'yaninov A. V., Pavlyukov A. E. Razrabotka tekhnicheskogo oblika trekhosnoy telezhi gruzovykh vagonov [Development of the technical appearance of a three-axle freight car bogie]. *Innovatsionnyy transport = Innotrans*. 2015;15(1):49-58. (In Russ.).

13. Vinogradov S. A., Mekhedov M. I., Vakulenko S. P., et al. Perspektivy razvitiya uskorennykh gruzovykh perevozok [Prospects for the development of accelerated freight transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2021;(4):10-15. (In Russ.).

14. Nasybullin A. M. Razmeshchenie gruzovykh mest v sostave poezdov postoyannogo formirovaniya [Placement of cargo packages as a part of train sets]. *Ekonomika zheleznikh dorog = Railway Economics*. 2021;(3):67-75. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Петрович ВАКУЛЕНКО,

канд. техн. наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), post-iuit@bk.ru, AuthorID: 284529, <https://orcid.org/0000-0002-6471-8690>

Мария Владимировна РОМЕНСКАЯ,

ассистент, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), AuthorID: 1082621

Кирилл Антонович КАЛИНИН,

ассистент, кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова д. 9, стр. 9), kalinin.k.a@mail.ru, AuthorID: 1049224, <https://orcid.org/0000-0001-6155-0012>

Константин Иванович ШВЕДИН,

заместитель директора научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», начальник отдела, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д.10), shvedin.konstantin@vniizht.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey P. VAKULENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Management and Digital Technologies, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), post-iuit@bk.ru, AuthorID: 284529, <https://orcid.org/0000-0002-6471-8690>

Mariya V. ROMENSKAYA,

Assistant, Department of Transport Business Management and Intelligent Systems, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), AuthorID: 1082621

Kirill A. KALININ,

Assistant, Department of Transport Business Management and Intelligent Systems, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), kalinin.k.a@mail.ru, AuthorID: 1049224, <https://orcid.org/0000-0001-6155-0012>

Konstantin I. SHVEDIN,

Deputy Director of the Research Center for Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies, Head of Department, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), shvedin.konstantin@vniizht.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Петрович ВАКУЛЕНКО. Постановка проблемы эффективности использования подвижного состава, в том числе при мультимодальных перевозках (20%).

Мария Владимировна РОМЕНСКАЯ. Разработка методики сравнения эффективности использования подвижного состава (50%).

Кирилл Антонович КАЛИНИН. Расчет кривых эффективности использования подвижного состава (20%).

Константин Иванович ШВЕДИН. Обзор применяемых в мультимодальных перевозках типов подвижного состава (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey P. VAKULENKO. Definition of the problem of the rolling stock efficiency including multimodal transportation (20%).

Mariya V. ROMENSKAYA. Development of a methodology for comparing the rolling stock efficiency (50%).

Kirill A. KALININ. Calculation of the rolling stock efficiency curves (20%).

Konstantin I. SHVEDIN. Review of the rolling stock types in multimodal transportation (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 17.03.2022, первая рецензия получена 05.04.2022, вторая рецензия получена 08.04.2022, принята к публикации 24.05.2022.

The article was submitted 17.03.2022, first review received 05.04.2022, second review received 08.04.2022, accepted for publication 24.05.2022.



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.22:656.043

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-179-187

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



КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОДВИЖЕНИЯ ВАГОНПОТОКОВ
НА ОСНОВЕ СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ СРОКОВ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ

О. В. Москвичев¹, Е. А. Мищенко¹✉, С. Н. Титаренко²

¹Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

²Куйбышевская дирекция управления движением —
Центральная дирекция управления движением — филиал ОАО «РЖД»,
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен анализ невыполнения нормативных сроков доставки грузов железнодорожным транспортом, который выявил снижение одного из важнейших качественных показателей — надежность доставки. Дана оценка работы существующих автоматизированных систем управления, выявившая разрывы и неавтоматизированные функции в рамках сквозного процесса доставки грузов и порожних вагонов в части контроля сроков доставки. Целью статьи является предложение и обоснование использования концептуальной модели организации продвижения вагонопотоков, основанной на сквозном контроле сроков доставки и риск-ориентированном воздействии на лимитирующие технологические элементы.

Материалы и методы. В статье применены методы современной теории управления транспортными потоками, теории математической статистики и теории принятия решений.

Результаты. Предложена концептуальная модель в рамках развития сквозного процесса доставки грузов и порожних вагонов, основанная на сквозном контроле сроков доставки грузов и риск-ориентированном воздействии на лимитирующие технологические элементы, в которой выделены следующие ключевые положения: контроль фактического срока доставки на станции за счет оценки выполнения технологических норм времени на операцию; сквозной риск-ориентированный контроль фактического срока доставки груза и порожних вагонов на всем пути следования; выдача рекомендаций по ускорению продвижения вагонопотока на основе технико-экономического обоснования.

Обсуждение и заключение. Реализация предложенной концептуальной модели позволяет перейти к научно обоснованному оперативному принятию решений по регулировке продвижения вагонопотока на каждом этапе в пути следования, повысить качество транспортного обслуживания и качество эксплуатационной работы железнодорожного транспорта. Концептуальная модель может быть исполнена в виде отдельного модуля, интегрированного в существующую автоматизированную систему управления станцией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность доставки, срок доставки, сквозной контроль, клиентоориентированность, железнодорожный транспорт, риск-ориентированный подход

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

Для цитирования: Москвичев О. В., Мищенко Е. А., Титаренко С. Н. Концептуальная модель организации продвижения вагонопотоков на основе сквозного контроля сроков доставки грузов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 179–187. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-179-187>.

Original article

UDK 656.22:656.043

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-179-187

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



CONCEPTUAL MODEL OF RAILWAY CAR TRAFFIC ORGANISATION BASED ON THE END-TO-END CONTROL OF FREIGHT DELIVERY TIMES

Oleg V. Moskvichev¹, Ekaterina A. Mishchenko¹✉, Sergey N. Titarenko²

¹Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

²Kuibyshev Directorate of Traffic Control —
Central Directorate of Traffic Control — branch of Russian Railways Company,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article presents the analysis of non-compliance of delivery times of railway cargoes with the regulatory time frames. The analysis reveals a decrease in the reliability of delivery, one of the most important quality indicators. The authors assess the operation of existing automated control systems, which shows discontinuities and non-automated functions in the framework of the end-to-end control of the goods and empty cars delivery times. The purpose of the article is to propose and justify the use of a conceptual model for organising car traffic, based on end-to-end control of delivery times and risk-oriented impact on the limiting technological elements.

Materials and methods. The authors applied the methods of the modern theory of traffic management, the theory of mathematical statistics and the theory of decision making.

Results. The authors propose a conceptual model based on end-to-end control of goods delivery times and a risk-oriented impact on the limiting technological elements as a part of development of end-to-end process of the goods and empty cars delivery. The model highlights the following key provisions: control of the actual delivery time to stations by assessing the compliance with the technological standard operation times; end-to-end risk-oriented control of actual delivery times of cargo and empty cars along the entire route; providing recommendations to accelerate the advancement of the car traffic based on the technical and economic feasibility study.

Discussion and conclusion. The implementation of the proposed conceptual model enables to employ scientifically based operational decision-making to control the flow of the traffic at each stage along the route and to improve the quality of transport services and the quality of operational work of railway transport. The conceptual model can be implemented as a separate module integrated into the existing automated station control system.

KEYWORDS: reliability of delivery, delivery time, end-to-end control, customer focus, railway transport, risk-oriented approach

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

For citation: Moskvichev O. V., Mishchenko E. A., Titarenko S. N. Conceptual model of railway car traffic organisation based on the end-to-end control of freight delivery times. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):179-187. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-179-187>.

Введение. Новая бизнес-модель, определенная Стратегией развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 г. [1], предусматривает трансформацию компании из перевозчика в транспортно-логистического оператора, способного управлять логистическим сервисом и организовывать формирование сквозных цепей поставок в грузовом сегменте. Она также определяет, что одной из ключевых ценностей компании является клиентоориентированность, взаимовыгодное долгосрочное партнерство с клиентами. Как показывают многочисленные исследования [2, 3, 4], одним из важных показателей для клиента является надежность доставки груза и порожних вагонов.

Оценивая статистику выполнения сроков доставки грузов (рис. 1), необходимо отметить непрерывный положительный рост данного показателя начиная с 2015 по 2020 г. Если рассматривать этот показатель в денежном эквиваленте, то нарушение сроков доставки влечет за собой миллиардные иски и штрафы за их невыполнение. Так, например, штрафы за нарушение срока доставки в 2020 г. оцениваются суммой в 7 млрд руб.

Качество предоставляемой услуги (перевозка) неразрывно связано с качеством производственных процессов, которое обеспечивается скоординированной деятельностью всех бизнес-блоков и подразделений на всех уровнях управления. Причинно-следственные связи, влияющие на выполнение нормативного срока доставки грузов, представлены на рис. 2.

Проведенный анализ невыполнения нормативных сроков доставки грузов в 2020 г. показал следующие причины нарушений сроков доставки в компании ОАО «РЖД»:

1. Необеспеченность тяговыми ресурсами — 66,73 %.
2. Недостаточная выгрузочная способность грузополучателя — 19 %.
3. Неэффективная организация и управление процессом перевозок — 5,2 %.
4. Неготовность инфраструктурного комплекса — 5 %.
5. Отрицательное влияние факторов внешней среды — 3,5 %.
6. Неудовлетворительное состояние подвижного состава — 1 %.

К основным причинам нарушения нормативных сроков доставки относится недостаточная обеспеченность тяговыми ресурсами, которая требует увеличения парка тягового подвижного состава, что, в свою очередь, влечет за собой значительные инвестиционные затраты для компании. Помимо причин нарушения нормативных сроков доставки по вине ОАО «РЖД» были выделены причины, относящиеся к ответственности грузоотправителя (грузополучателя), например недостаточная выгрузочная способ-

ность грузополучателя. Устранение подобной проблемы решается совместно с клиентом за счет разработки организационно-технических мероприятий по улучшению использования вагонов на грузовых фронтах, как правило требующих инвестиционных вложений и увеличения эксплуатационных расходов.

Кроме того, в результате анализа была выявлена причина, отражающая значительно меньшее количество нарушений: неэффективная организация и управление процессом перевозок. При этом решение проблем, связанных с данной причиной, не требует, как правило, значительных инвестиционных ресурсов. Следует отметить, что внутренние эксплуатационные затраты ОАО «РЖД» на перевозку грузов по сети железных дорог обратно пропорционально зависят от качества организации и управления перевозочным процессом. Поэтому особо важен системный методологический подход к устранению организационно-управленческих и технологических нарушений, приводящих к невыполнению нормативных сроков доставки грузов железнодорожным транспортом.

В частности, неэффективная организация и управление процессом перевозок связаны с отсутствием сквозного риск-ориентированного контроля фактического срока доставки груза на всем пути его продвижения от станции отправления до станции назначения и отсутствием этой функции в современных автоматизированных системах управления (АСУ).

Расчет плана формирования поездов не учитывает напрямую сроки доставки по корреспонденции грузопотока. Все входные параметры процессов обезличены по отношению к отправкам, и показателем процесса является максимально возможная совокупная переработка вагонных парков [5, 6]. При планировании, согласовании заявок на перевозку грузов и организации перевозок в договорах фиксируются лишь нормативные сроки перевозки, а управление движением выполняется без полноценной привязки контрольных процедур за отправленными грузами к конкретным поездам.

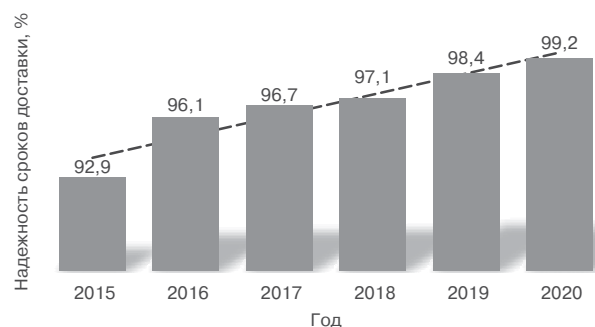


Рис. 1. Надежность сроков доставки по сети железных дорог России

Fig. 1. Reliability of delivery times on the Russian railway network



Рис. 2. Причинно-следственные связи, влияющие на выполнение нормативного срока доставки грузов

Fig. 2. Causality affecting the compliance with the standard freight delivery time

При оценке работы существующих АСУ [7, 8, 9, 10], представленных в таблице, были выявлены разрывы и неавтоматизированные функции в рамках сквозного процесса доставки грузов и порожних вагонов в части контроля сроков доставки. Несмотря на прогрессивность современных АСУ, их основной функцией остается сбор, хранение и выдача информации оперативным работникам железнодорожных станций, регионов управления и дороги в целом. Зачастую оперативный работник самостоятельно выполняет анализ полученной информации и принимает управленческие решения на основе своих знаний и профессионального опыта. Это приводит к затратам дополнительных временных ресурсов, которых нет при оперативной работе, и, как следствие, к недооценке ситуации, ошибкам в работе и еще большей потере времени на выполнение операций по организации продвижения вагонопотоков.

По сути, в настоящее время отсутствует технология сквозного риск-ориентированного контроля фактического срока доставки груза на всем пути его продвижения от станции отправления до станции назначения, а в существующих АСУ система оценки нарушения срока доставки неэффективна и приводит к решению проблемы постфактум.

В связи с вышесказанным в рамках развития организации сквозного процесса доставки грузов и порожних вагонов в части контроля сроков доставки необходимо перейти к риск-ориентированному воздействию

на лимитирующие технологические элементы процесса организации перевозок [5]. Ниже представлена концептуальная модель организации продвижения вагонопотоков на основе сквозного контроля сроков доставки грузов. Реализация риск-ориентированного подхода должна обеспечиваться автоматизированным поиском и поддержкой в принятии решений по исполнению максимально эффективных сценариев организации продвижения вагонопотоков в зависимости от сложившейся оперативной обстановки.

Результаты исследования. Для определения общей направленности предлагаемого концептуального подхода к организации сквозного контроля сроков доставки необходимо выделить следующие ключевые положения:

1. Контроль фактического срока доставки на станции за счет оценки выполнения технологических норм времени на операцию.
2. Сквозной риск-ориентированный контроль фактического срока доставки груза и порожних вагонов на всем пути следования.
3. Выдача рекомендаций по ускорению продвижения вагонопотока на основе технико-экономического обоснования.

Предлагаемая концептуальная модель должна базироваться на анализе времени исполнения отдельных технологических операций в процессе технологии организации перевозочного процесса. Ее использование может быть направлено на развитие функциональных возможностей автоматизированной

системы управления станции (АСУ СТ) в части автоматизации оперативного контроля сроков доставки грузов и порожних вагонов на всем пути следования.

Укрупненная схема технологии сквозного риск-ориентированного контроля фактического срока доставки груза на всем пути его следования от станции отправления до станции назначения представлена на рис. 3.

Контроль фактического срока доставки на станции за счет оценки выполнения технологических норм времени на операцию основывается на выявлении причин нарушения технологических норм времени на операции с вагоном и их дальнейшем предотвращении.

Алгоритм контроля (рис. 4) начинается с момента выполнения с вагоном технологических операций. *Фактическое время* выполнения технологической операции ($t_{\text{факт}}^{\text{опер}}$) возможно получить несколькими способами:

- исполнитель в лице работников станции (со-ставители, приемосдатчики, работники служб пункта технического обслуживания и др.) по радиосвязи докладывает о времени начала и окончания операций дежурному по станции (маневровому дежурному). Этот способ считается устаревшим и затрачивает значительную часть времени оперативных работников, что ведет к возможным ошибкам в процессе принятия оперативных управленческих решений;

- оперативные команды передаются и подтверждаются посредством АРМ и мобильных терминалов, параметры технологических операций регистрируются и логически контролируются программными средствами. Документация формируется в электронном виде и передается участникам технологического процесса.

Нормированное время выполнения технологической операции ($t_{\text{норм}}^{\text{опер}}$) в зависимости от типа выполненной операции передается из АСУ СТ. Далее идет сравнение полученных фактических и нормированных значений времени. Если фактическое время не превысило нормативного времени на операцию, то происходит поиск следующего вагона. В противном случае в базу данных АСУ СТ передается вся информация о вагоне и выполненных с ним операциях. На основании полученных данных, если в базе уже существует прецедент на решение возникающего случая, выдается рекомендация по ускорению продвижения вагона. Если технологическое нарушение имеет несистемный характер, информация накапливается для дальнейшей обработки.

Сквозной риск-ориентированный контроль фактического срока доставки груза и порожних вагонов (на каждой станции) основывается на сравнении нормативного срока доставки (T) с суммой текущего времени в пути следования ($T_{\text{тек}}$) и расчетного оставшегося времени срока доставки ($T_{\text{ост}}$).

Т а б л и ц а

Анализ функций контроля сроков доставки в существующих АСУ

Table

Analysis of delivery time control functions in existing automated control systems

Существующие АСУ	Обобщенные функции по контролю сроков доставки	Недостатки АСУ
Автоматизированная система управления местной работой (АСУ МР)	1. Выдача справки по оперативному контролю срока доставки вагонов: 1.1. С нарушенным сроком доставки. 1.2. В задержанных поездах. 1.3. С истекающим сроком доставки на текущие сутки, в следующие сутки, через двое суток. 1.4. Вагоны без операций более одних суток. 2. Выдача справки с номерами поездов при нарушении (риске нарушения) срока доставки; дата и станция последней операции с поездом.	1. Поступающие данные носят информационно-справочный характер. 2. Получение информации о нарушении (риске нарушения) срока доставки постфактум. 3. Отсутствуют управленческие рекомендации по ускорению продвижения вагонопотока при нарушении (риске нарушения) срока доставки.
Автоматизированная система управления станцией (АСУ СТ)	3. Уточнение информации по каждому поезду с раскрытием телеграммы-натурного листа (ТГНЛ). 4. Цветовое отображение информации по нарушению (при риске нарушения) срока доставки. 5. Фильтр справок по дорогам, регионам управления, станциям	4. Отсутствуют данные о рисках нарушений в разрезе более трех суток (АСУ МР выгружает на трое суток). 5. Принятые решения по ускорению продвижения вагонопотока оперативным персоналом не подтверждены технико-экономическим обоснованием.
Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения (ГИД) «Урал-ВНИИЖТ»		6. Отсутствует возможность контроля выполнения нормативов проследования отправки по диспетчерскому участку, региону, дороге
Автоматизированная система «электронная транспортная накладная» (АС ЭТРАН)	Ввод первичной информации и автоматический расчет срока доставки груза	Отсутствует возможность контроля срока доставки груза

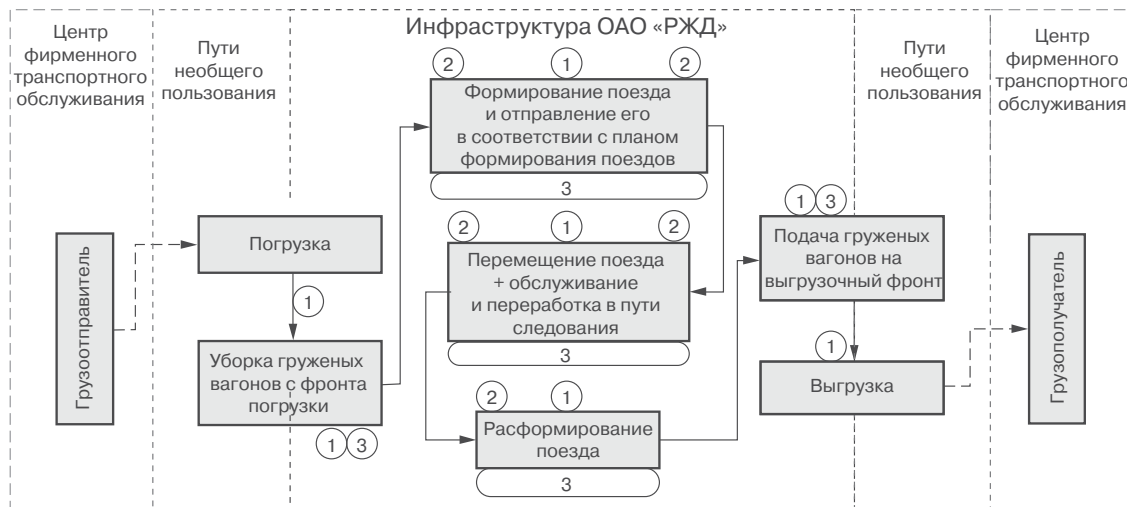


Рис. 3. Укрупненная схема перевозки «грузоотправитель — грузополучатель»:

- ① — контроль фактического срока доставки на станции за счет оценки выполнения технологических норм времени на операцию;
 ② — сквозной риск-ориентированный контроль фактического срока доставки при прибытии и отправлении поезда;
 ③ — выдача рекомендаций по ускорению продвижения вагонопотока на основе технико-экономического обоснования;
 - - - - - информационный поток; ————— материальный поток

Fig. 3. Enlarged diagram of consignor — consignee transportation:

- ① — control of the actual delivery time to the station by assessing the compliance with the technological standards of operation times;
 ② — end-to-end risk-oriented control of the actual delivery time upon train arrival and departure of the train; ③ — providing recommendations based on the feasibility study to accelerate the advancement of railway traffic; - - - - - information flow; ————— material flow

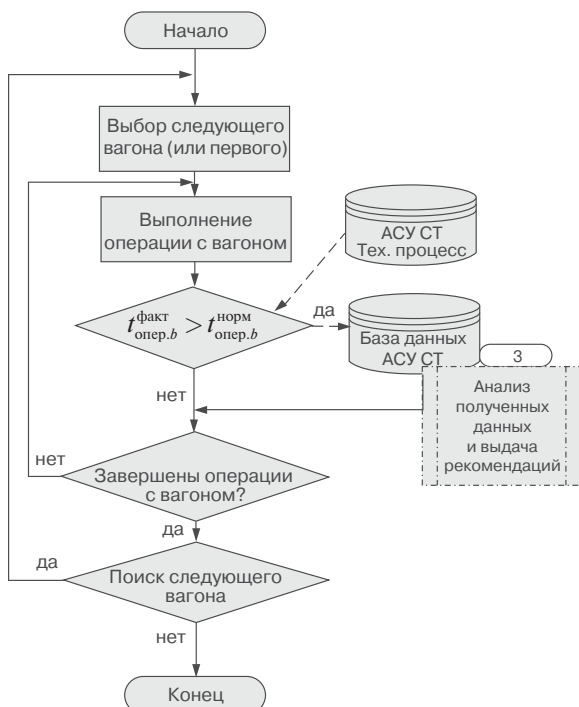


Рис. 4. Алгоритм контроля фактического срока доставки на станции за счет оценки выполнения технологических норм времени на операцию

Fig. 4. Algorithm for controlling the actual delivery time at the station by assessing the compliance with the technological operation time standards

Описание алгоритма сквозного риск-ориентированного контроля фактического срока доставки груза и порожних вагонов, представленного на рис. 5, следующее:

1. При прибытии и отправлении поезда производится оценка возможного нарушения срока доставки каждого вагона, которая начинается с первого по порядку.

2. С автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП) запрашивается форма ГУ-29ВЦ, содержащая информацию: дата доставки вагона к грузополучателю (ГП); нормативный срок доставки (T); единая сетевая разметка (ЕСР) станции назначения; расстояние маршрута (L).

3. Проверяется условие доставки вагона на станцию назначения: если ЕСР текущей станции совпадает с ЕСР станции назначения, то происходит переход к следующему вагону (пункт 1); если не совпадает — к пункту 4.

4. Из базы данных ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и АСУ СТ формируется информация: расстояние оставшегося пути по j -му участку ($L_{уч. j}$); средняя скорость следования по j -му участку ($v_{ср. j}$); время на оставшиеся дополнительные операции ($t_{доп}^{ост}$); текущее время в пути следования ($T_{тек}$); нормативное время нахождения на i -й станции ($t_{ст. i}^{норм}$).

5. Осуществляется расчет оставшегося времени срока доставки, необходимого для проследования вагона до станции назначения:

$$T_{\text{ост}} = t_k + \sum t_{\text{ст},i}^{\text{норм}} + \sum \frac{L_{\text{уч},j}}{v_{\text{ср},j}} + t_{\text{доп}},$$

где t_k — время на конечные операции, сут.

6. Проверяется условие риска нарушения срока доставки путем сравнения нормативного срока доставки (T) с суммой текущего времени в пути следования ($T_{\text{тек}}$) и расчетного фактического оставшегося времени срока доставки ($T_{\text{ост}}$). Если условие не выполняется, то данные передаются в АСУ СТ с дальнейшим анализом и экономически обоснованным выбором мероприятий для ускорения продвижения вагонопотока. Если условие выполняется, то переходим к пункту 7.

7. Происходит проверка существования следующего вагона в составе грузового поезда: если вагон найден, то происходит возврат к пункту 1 алгоритма; если нет — выход из алгоритма.

Выдача рекомендаций по ускорению продвижения вагонопотока на основе технико-экономического обоснования базируется на выборе возможных мероприятий при существующих условиях работы и в режиме online.

Подразумевается создание самообучающегося раздела в АСУ СТ на основании ее базы данных для выбора и принятия рекомендаций по ускорению продвижения вагонопотока. В этом разделе работники могут принимать оперативные управляющие решения, используя следующие способы:

1. Прецедентный — когда в базе уже находится подобный случай.
2. Расчетный — когда в базе не находится прецедент на рассматриваемый случай и следует расчет возможных вариантов с последующей выдачей их оперативным работникам.

3. Оперативные управленческие решения, принимаемые оперативным работником в нестандартных ситуациях исходя из своего профессионального опыта (при невозможности использования прецедентного способа).

Порядок выработки оперативных управленческих решений можно представить в следующей последовательности событий:

1. Выявление случаев нарушения и возможного нарушения сроков доставки, основываясь на приведенных выше алгоритмах.
2. Определение параметров выявленного случая с уточнением характеристики станции.
3. Поиск прецедентного случая выработки оперативных управленческих решений из базы данных АСУ СТ. Происходит их рассмотрение оперативным работником для выбора наилучшего варианта.
4. Переход к выработке оперативных управленческих решений с использованием расчетного способа (при невозможности использования прецедентного способа). Происходит поиск подобных случаев на

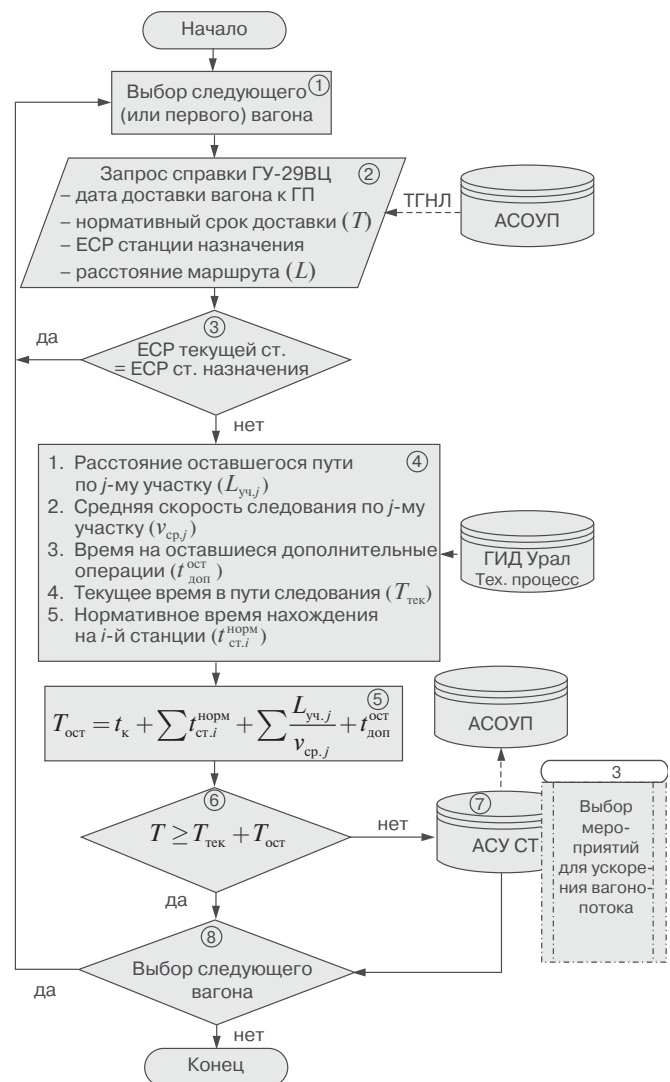


Рис. 5. Алгоритм сквозного риск-ориентированного контроля фактического срока доставки при прибытии и отправлении поезда

Fig. 5. Algorithm for end-to-end risk-oriented control of the actual delivery time at the train arrival and departure

других станциях с возможными решениями. Рассмотрение найденных решений под оперативную обстановку на станции с технико-экономическим обоснованием.

5. Оперативный работник рассматривает предлагаемые решения и выбирает наилучшее.

По мере увеличения продолжительности работы самообучающегося раздела принятия решений будут вырабатываться более точные оперативные управленческие решения и все меньшее количество из них будет требовать вмешательства оперативных работников. Поэтому целесообразно периодически выполнять анализ выработанных оперативными работниками решений в части их корректировки.

Примеры рекомендаций, выдаваемых самообучающимся разделом принятия решений:

- рассмотрение вариантов доставки вагонов на промежуточные станции прицепными группами к транзитным поездам;
- формирование удлиненных сборных поездов, обращающихся между двумя сортировочными станциями;
- пропуск транзитного вагонопотока через обходной путь;
- продвижение вагонов (транзитных, участковых, местных, порожних) с резервными, маневровыми, диспетчерскими, вывозными и подталкивающими локомотивами;
- календарное планирование погрузки, в первую очередь в местном сообщении, с учетом выгрузочных способностей станций назначения;
- перенос сортировочной работы по формированию (расформированию) части поездов на промежуточные станции;
- оптимизация системы организации вагонопотоков и местной работы на участках;
- оптимизация длины и массы состава поезда и прочие [11, 12, 13].

Заключение. Концептуальная модель организации продвижения вагонопотоков на основе сквозного контроля сроков доставки позволит повысить эффективность перевозочного процесса за счет непрерывного контроля сроков доставки грузов на всем пути следования от станции отправления до станции назначения и возможности принятия оперативных экономически целесообразных управленческих решений, а также минимизировать материальные и временные потери для всех участников рынка грузовых железнодорожных перевозок. Концептуальная модель может быть исполнена в виде отдельного модуля, интегрированного в существующую автоматизированную систему управления станцией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 г. (основное положение) [Электронный ресурс]: утв. советом директоров ОАО «РЖД» в декабре 2013 г. С. 49. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (дата обращения: 24.02.2022).
2. Гордиенко А. А., Зубков В. Н. Своевременная доставка грузов и порожних вагонов как способ повышения конкурентоспособности железных дорог // Альманах мировой науки. 2018. Т. 25, № 5. С. 18–25.
3. Югрина О. П., Казанцева Л. С. Вопросы определения срока доставки грузов на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4. С. 126–130.
4. Сокращение срока доставки грузов за счет организации движения соединенных грузовых поездов в период предоставления «окон» / О. В. Москвичев [и др.] // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 95–97.

5. Осьминин А. Т. О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 17–27.
6. Осьминин А. Т., Ададуров С. Е. В рамках цифровой трансформации перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2020. № 10. С. 4–10.
7. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» / ОАО «РЖД». М.: ОАО «РЖД», 2017. 92 с.
8. Москвичева Е. Е. Цифровая трансформация станционных технологических процессов // Наука и образование транспорту. 2020. № 1. С. 133–135.
9. Ерофеев А. А., Бородин А. Ф. Концепция интеллектуального управления перевозочным процессом и этапность ее реализации // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября 2020 г.): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко; Белорусский гос. ун-т транспорта. Гомель: БелГУТ, 2020. Ч. 1. С. 16–20.
10. Москвичев О. В. Информационные технологии и информационно-управляющие системы на магистральном транспорте / Самарский гос. ун-т путей сообщения. Самара: СамГУПС, 2015. 287 с.
11. Техничко-технологические модели управления перевозочным процессом / А. Ф. Бородин [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 7. С. 23–27.
12. Комплексная оценка эффективности назначения масс составов грузовых поездов в условиях реализации полигонных технологий / О. В. Москвичев [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2018. № 10. С. 9–12.
13. Левин Д. Ю. Диспетчерское управление вагонопотоками // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): тр. Восьмой науч.-техн. конф. (Москва, 21 ноября 2019 г.). М.: НИИАС, 2019. С. 51–58.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya kholdinga ОАО “RZhD” na period do 2030 g. (osnovnoe polozhenie) [Development strategy of the Russian Railways holding for the period up to 2030 (Basic provisions)]. Approved by the Board of Directors of Russian Railways in December 2013. P. 49. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=804> (access date: 24.02.2022). (In Russ.).
2. Gordienko A. A., Zubkov V. N. Svoevremennaya dostavka грузов i porozhnykh vagonov kak sposob povysheniya konkurentosposobnosti zheleznikh dorog [Timely delivery of cargo and empty cars as a way to increase the competitiveness of railways]. *Al'manakh mirovoy nauki = Almanac of the World Science*. 2018;25(5):18-25. (In Russ.).
3. Yugrina O. P., Kazantseva L. S. Voprosy opredeleniya sroka dostavki грузов na zheleznodorozhnom transporte [Issues of determining the delivery time of goods on railway transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modelling*. 2014;(4):126-130. (In Russ.).
4. Moskvichev O. V., Alexandrov V. I., Alexandrov E. V., Mishchenko E. A. Sokrashchenie sroka dostavki грузов za schet organizatsii dvizheniya soedinennykh грузовykh poezdov v period predostavleniya “okon” [Reducing the delivery time of goods by organizing the movement of connected freight trains during the periods of downtime]. *Nauka i obrazovanie transportu = Science and education for transport*. 2018;(1):95-97. (In Russ.).
5. Os'minin A. T. O razrabotke intellektual'noy sistemy upravleniya perevozochnym protsessom [Development of an intelligent system for managing the transportation process]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2021;(3):17-27. (In Russ.).
6. Os'minin A. T., Adadurov S. E. V ramkakh tsifrovoy transformatsii perevozochnogo protsessa [In the framework of the digital transformation of the transportation process]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2020;(10): 4-10. (In Russ.).

7. Kontseptsiya realizatsii kompleksnogo nauchno-tekhnicheskogo proekta "Tsifrovaya zheleznaya doroga" [The concept of the implementation of the integrated scientific and technical project "Digital Railway"]. Moscow: RZhD Publ.; 2017. 92 p. (In Russ.).

8. Moskvicheva E. E. Tsifrovaya transformatsiya stantsionnykh tekhnologicheskikh protsessov [Digital transformation of station technological processes]. *Nauka i obrazovanie transportu = Science and education for transport*. 2020;(1):133-135. (In Russ.).

9. Erofeev A. A., Borodin A. F. Kontseptsiya intellektual'nogo upravleniya perevozhnym protsessom i etapnost' ee realizatsii [The concept of intelligent management of the transportation process and the stages of its implementation]. Problemy bezopasnosti na transporte. [Problems of security in transport]. Procs. of the X Int. scientific-practical. conf. (Gomel, November 26–27, 2020). Gomel: BelGUT Publ.; 2020. Part 1. P. 16–20. (In Russ.).

10. Moskvichev O. V. Informatsionnye tekhnologii i informatsionno-upravlyayushchie sistemy na magistral'nom transporte [Information technologies and information and control systems on the mainline transport]. Samara: SamGUPS Publ.; 2015. 287 p. (In Russ.).

11. Borodin A. F., Panin V. V., Maksimova E. S., Lakhankin E. A. Tekhniko-tekhnologicheskie modeli upravleniya perevozhnym protsessom [Technical and technological models for managing the transportation process]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2021;(7):23-27. (In Russ.).

12. Moskvichev O. V., Alexandrov V. I., Alexandrov E. V., Mishchenko E. A. Kompleksnaya otsenka effektivnosti naznacheniya mass sostavov gruzovykh poezdov v usloviyakh realizatsii poligonnykh tekhnologii [Comprehensive assessment of the effectiveness of assigning the masses of freight trains in the conditions of the implementation of polygon technologies]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2018;(10):9-12. (In Russ.).

13. Levin D. Yu. Dispetcherskoe upravlenie vagonopotokami [Dispatch control of car flows]. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019) [Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modelling (ISUZhT-2019)]. Procs. of Eighth scientific and technical. conf. (Moscow, November 21, 2019). Moscow: NIIAS Publ.; 2019. P. 51–58. (In Russ.).

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), moskvichev063@yandex.ru, AuthorID: 388509, <https://doi.org/0000-0002-3423-1451>

Екатерина Алексеевна МИЩЕНКО,

старший преподаватель, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2в), AuthorID: 944234; <https://doi.org/0000-0003-3700-2141>

Сергей Николаевич ТИТАРЕНКО,

канд. техн. наук, начальник Куйбышевской дирекции управления движением, Центральная дирекция управления движением — филиал ОАО «РЖД» (443041, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 146).

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.), moskvichev063@yandex.ru, Author ID: 388509, <https://doi.org/0000-0002-3423-1451>

Ekaterina A. MISCHENKO,

Senior Lecturer, Operations Management Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Svobody St.), Author ID: 944234; <https://doi.org/0000-0003-3700-2141>

Sergei N. TITARENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Kuibyshev Directorate of Traffic Control, Central Directorate of Traffic Control — branch of Russian Railways Company (443041, Samara, 146, Lev Tolstoy St.)

ВКЛАД АВТОРОВ

Олег Валерьевич МОСКВИЧЕВ. Формирование идеи, развитие ключевых целей и задач, внесение замечаний интеллектуального содержания и критический пересмотр (25%).

Екатерина Алексеевна МИЩЕНКО. Разработка предложенной концепции, формулировка ключевых целей и задач, проведение исследования, анализ и интерпретация полученных данных, составление черновика статьи (50%).

Сергей Николаевич ТИТАРЕНКО. Сбор и предоставление данных для написания статьи, анализ практической ценности предложенной концептуальной модели для компании ОАО «РЖД» (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Oleg V. MOSKVICHEV. Idea generation, development of key goals and objectives, making comments of intellectual content and critical review (25%).

Ekaterina A. MISCHENKO. Development of the proposed concept, formulation of key goals and objectives, research, analysis and interpretation of the obtained data, drafting of the article (50%).

Sergey N. TITARENKO. Collection and provision of article data, analysis of the practical value of the proposed conceptual model for the Russian Railways Company (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

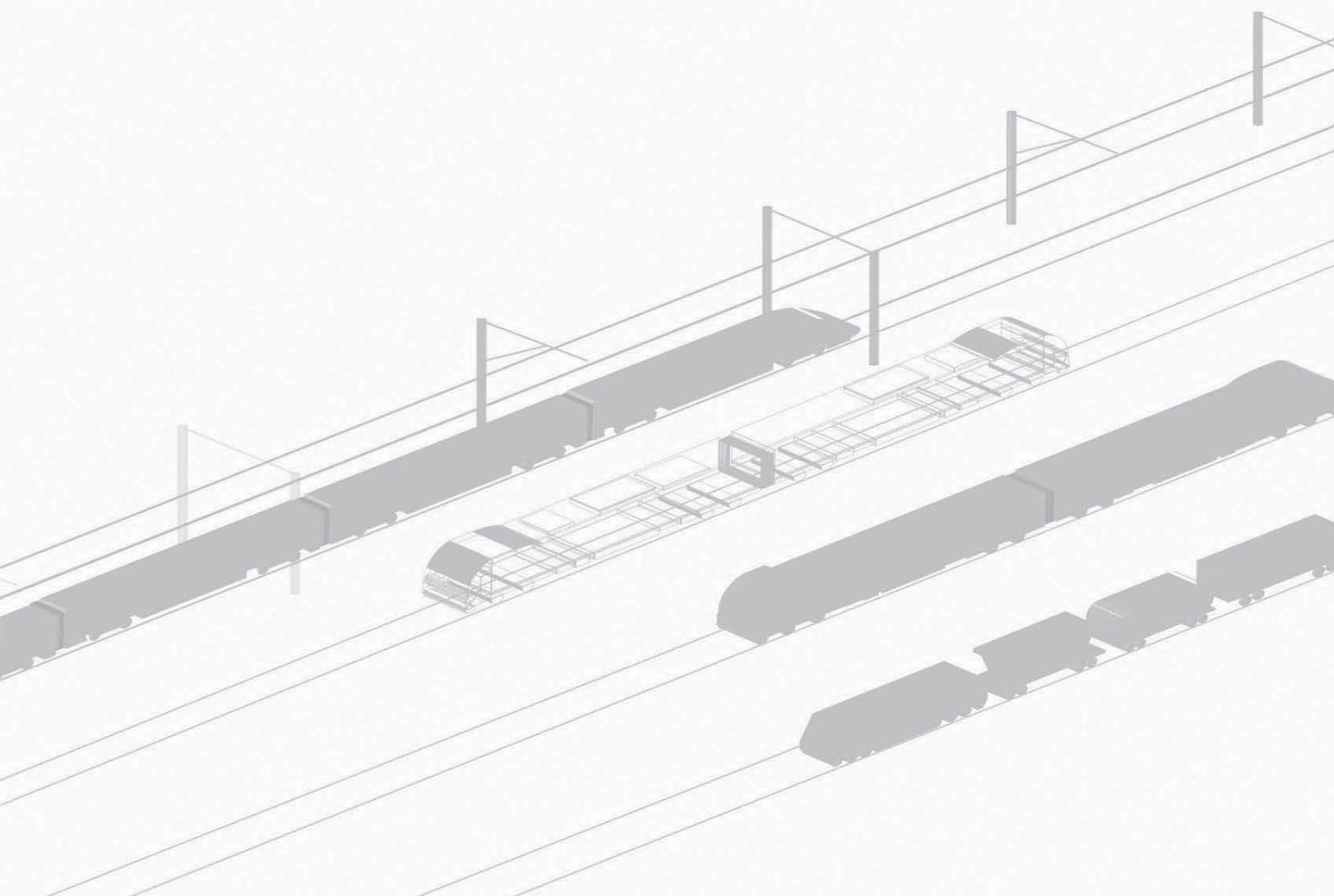
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

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

Статья поступила в редакцию 04.03.2022, первая рецензия получена 19.04.2022, вторая рецензия получена 24.04.2022, принята к публикации 27.05.2022.

The article was submitted 04.03.2022, first review received 19.04.2022, second review received 24.04.2022, accepted for publication 27.05.2022.

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА





ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Научная статья

УДК 002.6.048.26

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-189-202

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



ЖУРНАЛУ ВНИИЖТ – 80 ЛЕТ! ЧАСТЬ II. ПОБЕДА, ПОСЛЕВОЕННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ

А. Б. Косарев, О. Н. Римская, И. В. Анохов✉, И. В. Сиротенко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Каждый состоявшийся научный журнал должен соответствовать запросам читателей и требованиям своего времени. Это, в свою очередь, становится возможным, если журнал непрерывно развивается, выполняя свою главную миссию: увеличение доступных обществу научных знаний, в том числе через организацию содержательного научного дискурса на своих страницах. Целью данной статьи является исследование истории развития журнала «Техника железных дорог» после Победы в Великой Отечественной войне, когда на первый план вышли задачи послевоенного восстановления хозяйства и интенсивного развития путей сообщения на основе передовых научных знаний. Статья завершается оценкой нынешнего состояния журнала и дальнейших перспектив его развития.

Материалы и методы. В статье использованы исторический, аналитический и логический методы научного познания.

Результаты. Архивные данные журнала «Техника железных дорог» свидетельствуют о произошедших серьезных изменениях в научной журналистике. Редакция журнала постоянно искала новые способы взаимодействия с читателями, оптимизировала формат издания, уточняла рубрики и др. В конечном счете это нашло выражение в переименовании журнала: с 1956 г. журнал «Техника железных дорог» стал носить название «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта». В значительной мере это было связано с коренными преобразованиями в деятельности издателя — Центрального научно-исследовательского института Народного комиссариата путей сообщения СССР.

Обсуждение и заключение. Исследование истории ведущего печатного органа железнодорожной науки страны позволило сделать выводы о состоянии науки, о поставленных государством целях и об эпохе в целом.

Данная публикация является заключительной частью статьи, посвященной 80-летию журнала. Часть 1. Военные годы см. в Т. 80, № 6.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: научный журнал, техника железных дорог, Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, ЦНИИ, МПС

Благодарности: авторы статьи выражают признательность Российскому государственному архиву в г. Самаре за предоставленные архивные документы.

Для цитирования: Косарев А. Б., Римская О. Н., Анохов И. В., Сиротенко И. В. Журналу ВНИИЖТ — 80 лет! Часть II. Победа, послевоенное восстановление и современное развитие // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 189–202. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-189-202>.

✉ Anokhov.Igor@vniizht.ru (И. В. Анохов)

© Косарев А. Б., Римская О. Н., Анохов И. В.,
Сиротенко И. В., 2022



VNIIZHT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

Original article

UDK 002.6.048.26

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-189-202

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



VNIIZHT SCIENTIFIC JOURNAL CELEBRATES 80th ANNIVERSARY! PART II. VICTORY, POST-WAR RECOVERY AND MODERN DEVELOPMENT

Alexander B. Kosarev, Ol'ga N. Rimskaya,
Igor' V. Anokhov ✉, Igor' V. Sirotenko

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Each scientific journal should meet the needs of its readers and the imperatives of its time. The journal can acquire such status if it accomplishes its main mission: increasing the volume of scientific knowledge available to the society. This requires organisation of a meaningful scientific discourse on its pages. The purpose of the article is to study the history of the Railways Technology Journal development after the Victory in the Great Patriotic War, when the post-war restoration of the economy and the intensive development of communications using advanced scientific knowledge became the topmost priorities. The article ends with an assessment of the current state of the journal and future prospects for its development.

Materials and methods. The authors used historical, analytical and logical methods of scientific knowledge.

Results. The Railways Technology Journal archives testified to the serious changes that took place in scientific journalism. The editorial staff was constantly looking for new ways of interacting with readers, optimising the format of the journal, redefining sections, etc. Ultimately, the journal was renamed: since 1956 the Railways Technology Journal became known as the Bulletin of the All-Union Railway Research Institute. To a large extent, this was due to fundamental changes in the activities of the publisher, the Central Research Institute of the People's Commissariat of Communication Routes of the USSR.

Discussion and conclusion. The study of the history of the country's leading railway science journal enables to draw conclusions about the state of the science at the time, as well as the goals set by the country and about the era as a whole.

The publication is the final part of the article dedicated to the 80th Anniversary of the journal. Part 1. See the war years in Vol. 80, no. 6.

KEYWORDS: scientific journal, Railways Technology, Bulletin of the Railway Research Institute, Central Research Institute, Railways Ministry

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the Russian State Archive in Samara for the provided archival documents.

For citation: Kosarev A. B., Rimskaya O. N., Anokhov I. V., Sirotenko I. V. VNIIZhT Scientific Journal celebrates 80th Anniversary! Part II. Victory, post-war recovery and modern development. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):189-202. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-189-202>.

✉ Anokhov.Igor@vniizht.ru (I. V. Anokhov)

Введение. Вклад, который внес железнодорожный транспорт в Великую Победу, трудно переоценить. Действительно, «советский железнодорожный транспорт выдержал нагрузку, с которой едва ли справился бы транспорт какой-либо другой страны» [1, с. 1]. Но, пожалуй, не менее неотложные и масштабные задачи были поставлены перед ним после войны, например, в рельсовом хозяйстве: «За годы войны в связи с ограничениями в поставках металла образовалась запущенность в рельсовом хозяйстве, которое необходимо восстановить в самое ближайшее время, и, кроме того, в связи с перебазированием промышленности в годы войны и возникновением новых крупных промышленных центров произошли большие изменения в грузопотоках» [2, с. 3]. Одновременно с восстановлением разрушенного дорожного хозяйства стремительно росла потребность в новых транспортных мощностях для масштабных общегосударственных строек.

Соответственно, ставились новые цели и для железнодорожной науки, в том числе для Центрального научно-исследовательского института Народного комиссариата путей сообщения СССР (далее по тексту — ЦНИИ; позднее — Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта): «С победоносным окончанием войны перед Институтом встали новые задачи: развернуть работы в соответствии с потребностями послевоенного капитального восстановления и развития народного хозяйства» [3, с. 4]. Это было «зафиксировано в пятилетнем плане работ Института на 1946–1950 гг. Такого плана раньше никогда не составлялось ни в одной научно-исследовательской организации транспорта. Работы по пятилетнему плану Института рассчитаны внедрением и за пределами пятилетки» [3, с. 4].

Согласно этому пятилетнему плану было «необходимо широко развернуть научно-исследовательскую работу, основанную на глубоком теоретическом исследовании и широко производимых опытах. Большая ответственность в деле разработки новых образцов железнодорожной техники лежит на Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта» [1, с. 1].

Новый исторический этап и новые задачи журнала. Министр путей сообщения СССР генерал-лейтенант И. В. Ковалёв принял участие в научно-технической конференции Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта 30 марта 1946 г. [4, с. 1], где озвучил решения правительства о поддержке научной сферы (фото 1).

И. В. Ковалёв подчеркнул, что после создания необходимых условий научно-исследовательская работа института должна идти по трем основным направлениям:

1. Внедрение всех новейших достижений техники и науки для решения огромных задач, которые намечаются пятилетним планом на железнодорожном транспорте.

2. Разработка перспективных вопросов развития железных дорог и железнодорожной техники.

3. Оказание помощи железным дорогам в использовании резервов, имеющихся на транспорте.

Как видим, поставленные министром еще в 1946 г. задачи звучат вполне современно и в XXI в.

Министр путей сообщения СССР также поставил задачу расширения активности института в тех областях, которые он до этого момента рассматривал как вспомогательные, например экономические: «Вопросы экономики транспорта становятся для нас все более и более жизненными, потому что их решение даст возможность ускорить развитие транспорта, мобилизовать дополнительные ресурсы как для немедленного увеличения объема перевозок, так и для нового роста технического вооружения транспорта и для улучшения материально-бытового положения всех железнодорожников» [4, с. 4]. Несмотря на то что отделение экономики было создано еще в 1944 г., его деятельность уже в 1946 г. требовалось кардинально перестроить и масштабировать в соответствии с возросшими потребностями транспорта в новых экономических исследованиях. Так, в 1950 г. признавалось, что «Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта не развернул еще по-настоящему научно-исследовательскую работу в области экономики транспорта. Разрабатываемые отделением экономики института темы охватывают очень небольшой круг вопросов и часто не имеют обоснованных предложений вследствие недостаточно глубоких исследований» [5, с. 3].

Поставленные министром задачи были приняты руководством института для реализации и зафиксированы в программной статье «О мероприятиях по укреплению и развитию Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» [6, с. 27]. В ней отмечалось, что на коллектив института возлагается не только разработка и «научное обоснование путей и средств дальнейшего технического развития железнодорожного транспорта в направлении новых, более совершенных конструкций подвижного состава и постоянных устройств, современных методов ремонта и эксплуатации основного оборудования, максимального использования внутренних резервов транспорта и передовых методов железнодорожного строительства, но и задачи снижения себестоимости перевозок, установления принципов тарифной политики, вопросов хозрасчета и нормирования оборотных средств» [6, с. 27].



Ковалёв
Иван Владимирович
(1901–1993)

«Мы безусловно сможем создать большие и удобные лаборатории, приобрести необходимое и разнообразное научное оборудование, построить вспомогательные мастерские, организовать издательскую работу, обеспечив таким образом все условия для всемерного движения вперёд транспортной науки и техники. Решение правительства об улучшении материального положения работников науки является мероприятием исключительного масштаба. Оно создаёт все условия для высокопроизводительного и творческого труда наших учёных».

Фото 1. Цитата из речи министра путей сообщения СССР генерал-лейтенанта И.В. Ковалёва

Photo 1. Quote from the speech of the Minister of Railways of the USSR, Lieutenant General Ivan V. Kovalev

В статье отмечалась и исключительная важность привлечения инженерных кадров железной дороги к научной работе: «устанавливается новый порядок замещения должностей руководителей отделений, отделов и лабораторий по конкурсу. На должности младших научных сотрудников Главное управление кадров Министерства путей сообщения будет ежегодно направлять в ЦНИИ с производства по 30 инженеров, проработавших после окончания высшего учебного заведения не менее двух лет и проявивших способность и желание посвятить себя научно-исследовательской работе. На постоянную работу в ЦНИИ направляются высококвалифицированные рабочие из депо и заводов Московского узла» [6, с. 27].

Кроме того, в статье была представлена широкая программа по повышению квалификации научных работников и по их материальной поддержке: «Для изучения постановки научно-исследовательской работы в зарубежных странах ряд профессоров и других научных сотрудников ЦНИИ командируется в 1946–1947 гг. в США и Западную Европу... Для улучшения бытового положения профессоров и научных сотрудников ЦНИИ должно быть развернуто широкое жилищное строительство».

Главный печатный орган научно-исследовательского института — журнал «Техника железных дорог» также не мог оставаться в стороне от происходящих процессов. Редакционная коллегия журнала, судя по всему, ясно осознавала, что в послевоенной общественно-политической реальности железнодорожный транспорт должен был стать катализатором мощного народнохозяйственного развития, а значит, требовалась корректировка вектора железнодорожной науки и способа ее популяризации. Прежде задача журнала заключалась главным образом в том,

чтобы оказывать предельно практическую, методико-консультативную поддержку военно-дорожным службам по оперативному восстановлению путей сообщения и налаживанию работы железнодорожного транспорта. После Победы эту задачу следовало трансформировать: не только восстановить, но и построить качественно новый транспорт на самой современной научной основе.

Этот процесс наглядно виден и в изменении тематики статей в послевоенный период. Типичными стали такого рода названия:

- «О типах верхнего строения пути на послевоенный период».
- «Эксплуатационно-экономические требования к перспективным локомотивам».
- «Задачи и перспективы научно-исследовательской работы на железнодорожном транспорте».
- «К вопросу проектирования и строительства железных дорог в районе Крайнего Севера».
- «Механизация земляных работ на постройке железных дорог в горных условиях (строительствах новых железных дорог, вторых путей и развитии узлов в предстоящей пятилетке с учетом крупнейшего строительства Байкало-Амурской магистрали)».
- «Эволюция взглядов на выпучивание фундаментов сооружений в условиях вечной мерзлоты».

На страницах журнала рефреном проводилась мысль о новых масштабных целях и задачах железнодорожной науки: «Редакция будет стремиться привлечь к активному участию в журнале профессоров и преподавателей транспортных вузов, передовых инженеров НКПС, дорог, заводов, строителей, новаторов железнодорожного транспорта — кривоносовцев, лунинцев, папавинцев... Для всестороннего освещения новых технических проблем и предложений редакция будет помещать наиболее актуальные статьи в дискуссион-



Фото 2. Сотрудники ЦНИИ — лауреаты Сталинских премий [8, с. 1–2]

Photo 2. Employees of the Central Research Institute — laureates of the Stalin Prizes [8, p. 1–2]

ном порядке и призывает всех научных и инженерно-технических работников присылать в редакцию свои возражения и поправки, вытекающие из их производственного опыта на транспорте» [7, с. 1].

Эффективным способом популяризации достижений передовых инженеров и новаторов железнодорожного транспорта являлись регулярные публикации информации о лауреатах Сталинских премий в журнале, в том числе о сотрудниках ЦНИИ [8] (фото 2).

Такие сообщения выполняли важную мировоззренческую и воспитательную функцию, прежде всего для молодых работников института.

Научные журналы в центре внимания. Научные, общественно-политические, литературно-художественные, производственные и иные журналы находились в центре общественного и политического

внимания, что нашло свое отражение в передовице газеты «Правда» от 18 сентября 1951 г. — статье под названием «Повышать уровень работы редакций журналов» (фото 3).

В этой статье отмечалась острая необходимость в «повышении идейного уровня советских журналов» [9, с. 1]: «идейная выдержанность общего направления, боевой дух и целеустремленность в работе всех без исключения отделов — главный залог успеха». В частности, отмечалось, что «производственно-технические журналы стали шире печатать материалы, обобщающие практику коммунистического строительства, лучший опыт передовиков всесоюзного социалистического соревнования, пропагандирующие достижения советской науки». Вместе с тем «характерным недостатком некоторых журналов



Фото 3. Передовица газеты «Правда» от 18 сентября 1951 г.

Photo 3. Editorial of the Pravda newspaper, September 18, 1951

является их серость, бессодержательность, им часто недостает новой постановки вопросов, в них не чувствуется биения пульса жизни» [9, с. 1].

Руководствуясь указаниями в данной статье, членами редакционной коллегии на заседании 27 сентября 1951 г. признавалось, что «основными недостатками журнала «Техника железных дорог» являются: 1) недостаточное развитие критики и самокритики, недостаточно планомерный выбор тем для научных дискуссий и растянутость во времени проведения дискуссий, слабое развитие отдела «Критика и библиография»; 2) недостаточное освещение вопросов, связанных с великими стройками коммунизма, вопросов содружества работников науки и производства; 3) запаздывание с выходом в свет очередных номеров журнала, «серое» техническое оформление журнала» [10, л. 2].

Обсудив статью, редакционная коллегия журнала посчитала необходимым:

1. Организовать в журнале широкое освещение вопросов, связанных с великими стройками коммунизма, систематически помещать в журнале статьи о творческом содружестве работников науки и производства, привлекая материалы работников линии.

2. Наметить для отдела «Научные дискуссии» важнейшие проблемные вопросы для обсуждения их в журнале.

Для этого на каждого члена редакционной коллегии журнала было возложено ведение научных тем: механика, энергетика, паровозное, тепловозное и вагонное хозяйство, общетранспортные вопросы, вопросы путевого хозяйства, техники безопасности, эксплуатации искусственных сооружений, промышленного транспорта, связи, вопросы экономики и истории железнодорожного транспорта, развитие раз-

дела «Критика и библиография», вопросы зарубежного транспорта, электрификация железных дорог, металлы. Немаловажно, что редакционная коллегия того времени состояла всего из восьми человек, в том числе директора института и ряда авторитетных ученых, таких как Н. И. Белоконов, А. П. Петров, А. Ф. Золотарский (фото 4) и др. Учитывая, что с начала 1950-х гг. журнал выходил с периодичностью 12 выпусков в год, на каждого члена редакционной коллегии приходилась весьма значительная нагрузка.

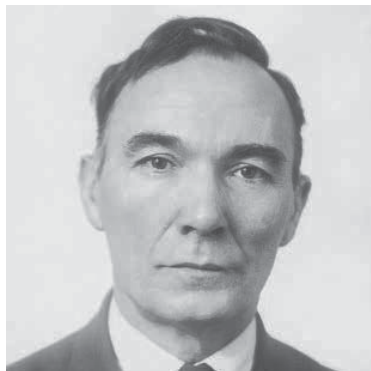
Сохранились протоколы заседаний редакционной коллегии, в которых отражены обсуждения разных вопросов о планах публикаций, а также решения о печати по конкретным статьям. Заметную долю занимало обсуждение вопросов об открытии дискуссии, целесообразности ее продолжения и о закрытии дискуссии. В разделе «Научные дискуссии» редакцией публиковалась специальная статья, в которой критически рассматривался определенный вопрос и подводились итоги редакционного исследования.

Так, в № 10 журнала за 1952 г. в дискуссии, посвященной улучшению профиля рельса для новых и обновляемых линий, участвовали канд. техн. наук А. И. Скаков [11], канд. техн. наук А. Ф. Золотарский и Б. М. Бромберг [12] (фото 5). Эти статьи были выдержаны в духе конструктивного и корректного обсуждения технических сторон предложений, высказанных в ранее опубликованной статье проф. П. Г. Козийчука [13]. Далее в том же номере следовала редакционная статья «К вопросу об улучшении профиля рельса» [14], в которой неназванные члены редакционной коллегии ведут обсуждение уже в ином стиле:

«Для снижения остаточных деформаций проф. Козийчук предлагает стремиться к такому распределению металла по сечению, “при котором в наибольшей степени обеспечивался бы выход рельса прямым при его остывании с высоких температур”. Создать такой профиль при существующих условиях охлаждения практически невозможно. <...>»

5. Утверждение проф. П. Г. Козийчука о недопустимости границ применения рельсов по грузонапряженности исходит из неверного предположения, что можно создать такой профиль рельса (при определенном его весе), напряжения в котором не будут превосходить предела выносливости. При этом упускается из вида то обстоятельство, что рельсы работают в условиях непостоянного режима загрузки, и в процессе их службы в пути пиковые напряжения (например, при прохождении колеса с ползуном на поверхности катания) нередко значительно превышают пределы выносливости рельсовой стали, не вызывая разрушения рельса».

Таким образом, редакционная коллегия нередко стремилась выступать третьей стороной в научных дискуссиях, высказывая коллективное мнение своих членов.



Белоко́нь Николай Иванович,
выдающийся ученый в области
термодинамики, теплотехники,
энергетики железнодорожного
транспорта и транспорта нефти и газа,
д-р техн. наук, профессор
(1899–1970)



Петров Александр Петрович,
выдающийся ученый в области эксплуатации
железных дорог, основоположник применения
вычислительной техники на железнодорожном
транспорте, д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент АН СССР,
Герой Социалистического Труда
(1910–1982)



Золотарский Алексей Федорович,
видный ученый
в области путевого хозяйства,
д-р техн. наук, профессор
(1905–1988)

Фото 4. Члены редакционной коллегии журнала «Техника железных дорог»

Photo 4. Editorial Board members of the Railways Technology Journal

Вполне вероятно, что подобные дискуссии инициировались и вышестоящими органами для прояснения того или иного насущного научного вопроса и для мобилизации научных и инженерных кадров

транспорта на активное и ответственное решение технических задач. Напомним, что послевоенное восстановление промышленности было еще далеко не завершено, решения по многим вопросам нужно

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ

Лауреат Сталинской премии, канд. техн. наук А. И. СКАКОВ

ОБ УЛУЧШЕНИИ ПРОФИЛЕЙ РЕЛЬСОВ

Статья проф. П. Г. Козийчука «Об улучшении профиля рельса» [1] открыла дискуссию по чрезвычайно важному для железнодорожного транспорта вопросу о том, чем следует руководствоваться при проектировании улучшаемых и новых профилей рельсов. В ряде статей, опубликованных в нескольких последних номерах журнала «Техника железных дорог» ([2] — [4]), этот вопрос получил разностороннее, но, по нашему мнению, всё же недостаточное освещение.

Как справедливо отмечает П. Г. Козийчук, работа по улучшению профиля рельсов ведётся у нас уже давно и успешно. Примером того, насколько эффективно может быть улучшение профиля рельсов, является замена рельса типа I-а равным ему по весу рельсом типа Р43. Поэтому опыт улучшения рельса типа I-а заслуживает более подробного рассмотрения.

Результаты статистического исследования выхода по дефектам и изломам рельсов типов I-а и II-а послужили основанием для улучшения профиля рельса типа I-а и создания взамен него нового типа I-у (улучшенного), позднее введённого в стандарт на сортament (ГОСТ 3542-47) под обозначением Р43. Улучшение профиля рельса типа I-а в основном состояло в уменьшении ширины подошвы со 125 до 114 мм, т. е. до ширины подошвы рельса типа II-а. Сомнения относительно устойчивости рельса типа I-у, у которого отношение ширины подошвы к высоте рельса составляет только 0,81 (вместо 0,89 для рельса типа I-а и 0,84 для рельса типа II-а), были рассеяны почти пятнадцатилетним опытом эксплуатации рельсов Р43. Этот опыт доказал, что отношение ширины подошвы к высоте рельса, равное 0,81, вполне достаточно для обеспечения устойчивости рельсов в пути.

Фото 5. Раздел научных дискуссий в журнале № 10 за 1952 г.

Photo 5. Section of scientific discussions in the journal No. 10, 1952

было принимать оперативно, иногда волевым порядком при недостатке теоретических и экспериментальных данных.

С середины 1954 г. проводились устные дискуссии внутри научных подразделений, в печать направлялись только статьи-рецензии, а с 1955 г. дискуссии из журнала исчезли совсем. Журнал стал гораздо более академичным, с применением математических подходов, высокое качество статей было обеспечено рецензированием и одобрением результатов работы у заказчиков, главным из которых было МПС. Публиковались прекрасные статьи, в которых были освещены направления развития транспортной системы страны на будущее [15] и проблематика, связанная с этим развитием [16], но со страниц журнала исчез диалог между учеными. Журнал стал отражением того, что уже сделано и реализовано на практике.

Поиски нового формата работы с читателями. В 40–50-е гг. редакция журнала активно работала со своими читателями. В конце 1949 г. всем подписчикам вместе с журналом была разослана анкета, где перед читателями был поставлен ряд вопросов, ответы на которые должны были показать, какие статьи понравились читателям, какие статьи не удовлетворили их и по какой причине, освещение каких вопросов на страницах журнала они желали бы увидеть. Такая анкета с помощью Центральной научно-технической библиотеки МПС (далее — ЦНТБ) была также разослана дорожным и линейным библиотекам по всей сети железных дорог с письмом и просьбой организовать конференции на тему «Каким читатель желает видеть журнал «Техника железных дорог» [17].

Это обращение нашло живой отклик, и в результате большой работы библиотекарей на линиях в дорожных и узловых библиотеках было проведено 48 читательских конференций. Готовясь к ним, библиотекари привлекли к проведению докладов о журнале наиболее активных читателей. В качестве докладчиков выступили главные и старшие инженеры паровозных депо, главные инженеры служб управлений дорог, научные работники и др. Всего в конференциях приняло участие около 2000 человек и около 400 человек прислали в редакцию и ЦНТБ свои ответы на анкету журнала.

Выступая на конференциях, активисты-читатели указывали, что журнал содействует их техническому развитию и помогает инженерам совершенствовать технику на своем производстве. Например, на читательской конференции станции Котельниково было отмечено, что «журнал даёт много полезного и нужного в работе движенцев и помогает развитию передовых методов. Научные статьи должны быть более тесно увязаны с практикой и рассчитаны на помощь практикам — таково общее требование читателей».

Такой формат встреч с читателями был признан удачным и стал практикой в работе редакции. Напри-

мер, 30 мая — 2 июня 1952 г. в Московском электромеханическом институте инженеров железнодорожного транспорта им. Ф. Э. Дзержинского редакцией журнала была проведена устная дискуссия по вопросу о применении теории подобия в транспортной теплотехнике. В 1953 г. очередная читательская конференция была проведена в управлении Московско-Рязанской железной дороги, причем по инициативе самой дороги. В 1954 г. читательская конференция охватила библиотеки при управлениях дорог и высших технических учебных заведениях [18] (фото 6).

Это позволило организовать научные дискуссии по отдельным вопросам транспортной науки с привлечением сотрудников высших учебных заведений и инженеров предприятий железнодорожного транспорта.

Редакция была инициатором организации дискуссии не только на страницах журнала, железных дорогах и в структурных подразделениях ЦНТБ, но и в цехах самого ЦНИИ. Так, в 1951 г. она организовала «в отделении электрификации совещание с подведением итогов дискуссии по вопросу выбора оптимальных параметров энергоснабжающих устройств электрифицированных железных дорог» [10, л. 3]. В 1954 г. в отделении путевого хозяйства ЦНИИ была организована устная дискуссия по вопросам бесстыкового пути. Аналогичные обсуждения организовывались по вопросу о методах планирования подачи и уборки вагонов на грузовых станциях и др.

Руководством ЦНИИ придавалось большое значение таким видам редакционной работы. Так, например, И. А. Иванов, который в 1947 г. был назначен заместителем директора, а в 1951 г. — директором ЦНИИ, возглавлял редакцию журнала и выступил в 1958 г. организатором конференции читателей и авторов журнала «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» (фото 7).

На этой конференции выступающие «отмечали большое значение журнала для пропаганды передовых научных идей и новых исследований» [19]. Указывалось на достаточно высокий теоретический уровень публикуемых статей. Оживленный обмен мнениями произошел по вопросу о статьях с большим количеством сложных математических формул. Подавляющее большинство выступивших в прениях указывали, что, всемерно избегая излишней «математизации» статей, было бы неправильным снижать теоретический уровень издания. «Журналу следует ориентироваться не только на научных работников, но также и на тех инженеров и техников, которые, находясь на производстве, совершенствуют свои знания, ведут научно-техническую и исследовательскую работу». В прениях также отмечалось недостаточное количество публикуемых статей по экономическим

ЧИТАТЕЛЬСКИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

Для улучшения содержания журнала и изучения запросов читателей редакция журнала «Техника железных дорог» совместно с Центральной научно-технической библиотекой МПС обратилась к руководителям библиотек при управлениях дорог и высших технических учебных заведениях с просьбой провести конференции читателей журнала.

Первая читательская конференция состоялась в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта. В прениях по докладу представителя редакции А. Н. Жилина читатели, отмечая некоторые достижения журнала, указывали на недостаточное в нём освещение передовых методов труда, опыта новаторов с анализом и обобщением их работы, вопросов перспективного развития отдельных отраслей железнодорожного хозяйства и экономики, новой техники и, в частности, развития тепловозной тяги, связи и СЦБ, на отсутствие статей по вопросам эксплуатации верхнего строения пути и искусственных сооружений.

На кафедре «Водоснабжение и канализация» под председательством проф. А. А. Сурина было проведено заседание, посвящённое обсуждению журнала «Техника железных дорог», на котором была отмечена полезность и актуальность помещённых в журнале в 1952—1953 гг. 11 статей по вопросам водоснабжения и водоподготовки, материалы которых использованы в учебных и научных занятиях.

Кафедра «Проектирование железных дорог» (руководитель проф. С. А. Орбельян) считает, что из статей, опубликованных в журнале в 1953 г., наибольший интерес представляют статьи В. Н. Стогова, А. А. Лещинского «Ускорение оборота вагонов — важнейший резерв железнодорожного транспорта», А. И. Смирнова «К вопросу о классификации промышленных железных дорог», Ю. К. Полосина «О ширине колеи в переходных кривых», Е. А. Ашкенази «О типах узкоколейных паровозов», а также И. А. Сазонова

«Скоростное вождение тяжёловесных поездов» и другие статьи, касающиеся достижений передовиков транспорта.

Кафедра считает желательным более широкое освещение вопросов выявления резервов пропускной и провозной способности, сопротивления движению поезда при переводе подвижного состава на роликовые подшипники; технико-экономические сравнения вариантов эффективности капиталовложений и отмечает, что недостаточно освещаются также вопросы экономики эксплуатации железных дорог и взаимодействия пути и подвижного состава.

В Ростовском институте инженеров железнодорожного транспорта перед конференцией была организована выставка номеров журнала со статьями научных работников РИИЖТ, со статьями по дискуссии о теории подобия в паровозной теплотехнике и письменных отзывов читателей о журнале. На конференции были заслушаны доклады: о задачах журнала — доц. Х. И. Дементьева; об опыте своей работы как автора — доц. С. Я. Айзінбуда; об одной дискуссии — доц. Д. Э. Кармилского; об участии в журнале научных работников института — К. П. Ивлиева.

Выступавшие рекомендовали проведение научных дискуссий по отдельным вопросам транспортной науки по примеру дискуссии по вопросам теории подобия. Указывалось на желательность увеличения числа критических статей, рецензий и библиографических указателей с привлечением к написанию их сотрудников периферийных высших учебных заведений и инженеров предприятий железнодорожного транспорта. Было отмечено также, что сроки рецензирования статей необходимо сократить и что некоторые рецензии имеют тенденциозный характер.

Эти и другие указания и предложения участников читательских конференций, а также оценки отдельных статей помогут редакции журнала в её работе по улучшению содержания журнала и удовлетворению запросов читателей.

Фото 6. Информация о конференции читателей журнала «Техника железных дорог» в 1954 г. [18]

Photo 6. Information about the readers conference of the Railways Technology Journal in 1954 [18]

вопросам и указывалось, что статьи технического характера часто печатаются без должного экономического анализа предлагаемых конструкций, мероприятий и др.

В журнале появилась новая рубрика под названием «Консультация», в которой квалифицированные ученые отвечали на вопросы читателей журнала [20, 21] (фото 8).

Появление такой рубрики позволяло наладить устойчивую обратную связь с читателями и тем самым сократить дистанцию между наукой и практической деятельностью.

Кроме того, редакция перешла от пассивного ожидания поступления статей к их активному заказу по наиболее востребованным темам. Так, передовая статья № 3 за 1954 г. «Всемерно использовать резервы ускорений оборота вагона» была заказана целому коллективу авторов:

- А. П. Петров, К. С. Симонов — раздел статьи «Совершенствование технологического процесса работы крупных железнодорожных узлов — резерв увеличения пропускной способности».

- Н. А. Албегов — раздел статьи «Резервы повышения тормозной эффективности грузовых поездов».

- А. В. Плакс — раздел статьи «Максимальное использование мощности электропоезда при повреждении одного из тяговых двигателей» [22, л. 6—7].

Что примечательно, написание таких статей зачастую поручалось линейным сотрудникам железных дорог, например старшим машинистам [22, л. 6].

Потребности страны в журнале Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Значимость журнала «Техника железных дорог» была велика как в годы войны, так и после Победы: журнал имел общесоюзное значение и поэтому находился в центре внимания вышестоящих организаций и общественности.

Фото 7. Иванов
Иван Андреевич,
крупный специалист
в области путевого
хозяйства железных
дорог, канд. техн. наук,
Герой Социалистического
Труда
(1904—1987)

Photo 7. Ivan A. Ivanov,
a major specialist
in the field of railway
track facilities, Dr. of Sci.
(Engineering),
Hero of Socialist Labour
(1904—1987)



КОНСУЛЬТАЦИЯ

Вопрос. Что представляют собой электротензометрические путевые весы?

Ответ. Измерительным устройством, воспринимающим давление паровоза, в электротензометрических весах служит специальный прибор с электрическими тензодатчиками в виде проволоочных датчиков.

Как известно, при растягивании металлической проволоки меняется её электрическое сопротивление, причём изменение этого сопротивления пропорционально изменению длины. Если такую проволоку наклеить на испытываемую деталь и последнюю деформировать, то путём измерения электрического сопротивления заранее протарированного датчика (проволоки) можно определить поверхностные деформации детали и, далее, расчётным путём — силы, вызвавшие эти деформации.

В электротензометрических весах приборы (с датчиками), верхняя часть которых имеет форму головки рельса, устанавливаются (на жёстком основа-

нии) в специально устраиваемых зазорах в обоих рельсах.

Когда колёса взвешиваемой оси паровоза или электровоза наезжают на приборы, последние испытывают упругие деформации. Те же деформации получают датчики, смонтированные в приборе. Измеряя сопротивление датчиков, можно определить давление на ось.

Вопрос. Какими методами производят измерения собственных напряжений в балках железнодорожных мостов?

Ответ. Для измерения собственных напряжений в деталях конструкции в настоящее время применяются рентгеновский и механический методы. Механический метод основан на определении упругих деформаций, возникающих в исследуемой детали после освобождения её от собственных напряжений. Существует несколько приёмов освобождения детали от собственных напряжений: обточка, строжка, разрезание детали на части, просверливание отверстий.

Собственные напряжения в балках железнодорожных мостов можно изу-

чить механическим методом. Для этой цели в интересующих сечениях наносят базы и снимают начальные отсчёты. После этого (при помощи сверления по контуру) вырезаются темплеты с базами и последние вновь измеряются. Отношение разности отсчётов к начальной базе даёт величину деформации. Умножая эту величину на модуль упругости, получают снятые напряжения, т. е. те напряжения, которые имели место до вырезки темплета из балки.

Существуют ещё приёмы, сводящиеся к измерению базы в процессе сверления (вблизи неё) отверстия в изучаемом образце. Эти приёмы ещё не нашли широкого применения.

★

ПОПРАВКА

В журнале № 1 на стр. 22, прав. столбец, 32 строка снизу следует читать:
«В осуществление принятого XVII Съездом ВКП(б) второго пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР . . .»

★

КОНСУЛЬТАЦИЯ

Вопрос. Возможно ли для получения безударного стыка рельсов применение изогнутых накладок, создающих предварительный подъём рельсов, равный величине прогиба их при среднем давлении колёса на рельс и при средней температуре воздуха?

Ответ. Удары стыка происходят вследствие наличия стыковой ступеньки и вредного угла. Ступенька образуется возможной разностью допусков в высоте соединяемых рельсов. Вредный угол получается за счёт меньшей жёсткости пары накладок по сравнению с цельным рельсом.

Для того чтобы стык сделать безударным, нужно устранить причины образования стыковой ступеньки и вредного угла, т. е. устранить разность допусков встречных рельсов и приравнять жёсткость накладок к жёсткости цельного рельса. Практически это может быть достигнуто только при сварке стыков. Во всех же остальных случаях можно говорить только о смягчении ударов в стыках.

Выгиб накладок вверх не снимает возможной разности допусков в рельсовых концах, не улучшает условия прилегания накладок к пазухам рельсов и не увеличивает жёсткости накладок. Следовательно, это мероприятие не обеспечивает безударности стыка. В то же время применение выгиба накладок приводит к порче самих накладок, а в известных случаях ухудшает работу рельсовых концов.

Выгибы накладок применяли на Южных дорогах. Но этот опыт привёл в конечном итоге к массовому излому рельсовых концов, после чего такой способ был запрещён.

Чтобы воздействовать на смягчение ударов в стыках, следует осуществлять комплексное оздоровление рельсовых стыков и заботиться о хорошем их текущем содержании. Никаких выгибов накладок производить не рекомендуется, тем более, что в практике действуют не средние давления колёс на рельсы и не при средней температуре воздуха, а более сложные и притом разнообразные условия воздействия на путь внешних факторов.

Вопрос. Какое существует положение о вознаграждении и какие существуют льготы изобретателям, получившим авторские свидетельства, и лицам, предложившим технические усовершенствования?

Ответ. Изобретатель или лицо, предложившее усовершенствование, в зависимости от технического значения, экономии или иного эффекта, достигаемого принятием изобретения или техническим усовершенствованием народного хозяйства, и степени завершенности их получает вознаграждение по инструкции, утверждённой СНК СССР № 1904 от 27/XI 1942 г.

Вознаграждение за изобретение или техническое усовершенствование, не превышающее 10 000 руб., подоходным налогом не облагается; если же воз-

награждение превышает 10 000 руб., налог исчисляется со всей суммы вознаграждения за вычетом 10 000 руб.

О всех реализованных изобретениях и технических усовершенствованиях и выплаченном за них вознаграждении производится отметка в трудовой книжке.

Изобретатели имеют, при прочих равных условиях, преимущественное право занимать должности научных работников в соответствующих научно-исследовательских и опытных учреждениях и предприятиях.

Вопрос. Кто определяет размер вознаграждения за предложение и кто его выплачивает?

Ответ. Размер и выплата вознаграждения производятся руководителем хозяйственной организации, принявшей предложение к использованию.

Если предложение используется несколькими предприятиями одного главного управления министерства, вознаграждение автору исчисляется и выдаётся главным управлением.

Если предложение используется предприятиями нескольких главных управлений, входящих в систему одного министерства, или предприятиями, подчинёнными непосредственно министерству, вознаграждение исчисляется и выплачивается министерством.

При выдаче вознаграждения главным управлением или министерством засчитываются суммы вознаграждения, полученные автором за данное предложение на предприятии.

★

Фото 8. Новая рубрика «Консультация» [20, 21]

Photo 8. New section "Consultation" [20, 21]

В протоколе заседания редакционной коллегии журнала «Техника железных дорог» от 5 марта 1954 г. отмечалось, что он рассматривался в промышленно-транспортном отделе ЦК КПСС и в политуправле-

нии МПС, в ходе чего был сделан ряд практических указаний: «в журнале в 1953 г. было недостаточно отражено постановление Совета Министров СССР и ЦК КПСС от 6 октября 1953 г. в опубликованных статьях

по передовым методам труда; нет глубоких научных обобщений; мало пропагандируется новая техника, эффективность ее применения; нет в статьях критики с указанием фамилий; недостаточно статей по безопасности движения; много в журнале статей со сложными формулами и др. Даны рекомендации смелее отклонять слабые статьи, составить ориентировочные планы номеров журнала на весь год, обсудить вопрос о возможности изменения названия журнала» [22, л. 1].

Вскоре после этого, в мае 1954 г., журнал «Техника железных дорог» вновь специально рассматривался в промышленно-транспортном отделе ЦК КПСС. «В результате рассмотрения было отмечено, что журнал все еще не удовлетворяет тем требованиям, которые ему предъявляются, медленно раскачивается на выполнение постановления Совета Министров СССР и ЦК КПСС по железнодорожному транспорту от 6 октября 1953 г., в журнале все еще преобладает теоретический материал, нет освещения передового опыта, как изложенного самими новаторами, так и в изложении и обобщении научных работников, и ряда других актуальных вопросов» [23, л. 9].

Кроме того, журналу предписывался не научно-теоретический, а научно-практический вектор развития: «Все статьи журнала должны быть направлены без снижения их научного уровня на освещение актуальных вопросов в помощь железнодорожному транспорту в освещении поставленных перед ним партией больших неотложных задач. Для опубликования же теоретических научных работ, работ с формулами и расчетами возможно будет организовано издание специальных бюллетеней или сборников» [23, л. 10].

Итогом пристального внимания к журналу со стороны промышленно-транспортного отдела ЦК КПСС и политуправления МПС стало решение от 2 июля 1956 г. о переименовании журнала «Техника железных дорог» в «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Журнал теперь ориентировался на максимально широкий круг читателей: научных работников железнодорожного транспорта, профессорско-преподавательский состав вузов и техникумов, инженерно-технических работников управлений, линий, лабораторий и др.

В связи с переименованием в журнале устанавливались следующие основные разделы:

а) «Общестейный» — с освещением в нем теоретических и экспериментальных работ института, транспортных высших учебных заведений, дорожных, деповских и других лабораторий, инженерно-технических работников управлений железнодорожных линий и др. (по всем отраслям железнодорожного хозяйства), с описанием новых конструкций и машин (локомотивов, вагонов и т. д.) и результатов их испытаний, помещением статей с научным обобщением

передовых методов работы на железнодорожном транспорте, дискуссионных статей и др.

б) «Информация и хроника» — с освещением в нем работы ученых советов института и высших транспортных учебных заведений, научно-технических совещаний и конференций, новинок лабораторного оборудования для научных исследований, помещением в разделе аннотаций защищенных диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических и других наук и др.

в) «За рубежом» — с освещением в нем информации о научных исследованиях и новостях науки и техники за границей.

г) «Критика и библиография» [24, л. 1].

Переименование журнала не только подчеркивало вклад Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта в транспортную науку, но и означало переход от строго технических вопросов (новая локомотивная техника, путь и путевое хозяйство, эксплуатация железных дорог) к более широкому перечню рассматриваемых сфер: организационной, экономической, информационной и др. Тем самым 2 июля 1956 г. начался новый этап развития журнала ВНИИЖТ, который продолжался в последующие десятилетия и сопровождался в том числе обновлением внешнего вида издания (фото 9).

Все вышесказанное говорит о том, что с момента создания журнал ВНИИЖТ всегда продолжал свое развитие, следуя вызовам времени и новым задачам, но при этом сохраняя свою уникальность.

В 2022 г., в 80-летний юбилей, мы переосмысливаем достижения и опыт журнала ВНИИЖТ за минувшие десятилетия, изучаем возможности его применения в современных условиях, а также намечаем новые рубежи и цели. Так, редакция планирует воссоздать ряд рубрик, реанимировать на своих страницах научные дискуссии, возродить читательские конференции как в очном формате, так и на электронных площадках. Планируется пересмотреть взаимодействие и с рецензентами: наиболее значимые и авторитетные из них получили сертификат рецензента и личный доступ к сайту журнала для контактирования с членами редакции напрямую, что делает возможным использование новых форм взаимодействия.

Первый номер журнала за 2022 г. претерпел ряд значимых трансформаций: изменилась обложка, оформление внутреннего блока, утверждено новое англоязычное название журнала, повышены требования к научной состоятельности статей, внедрено обязательное наличие двух внешних рецензий. Кроме того, журнал теперь выпускается 4 раза в год, что связано с необходимостью более тщательной подготовки статей, удлинением процесса рецензирования, научного и языкового редактирования.



Фото 9. Обложки журнала разных лет

Photo 9. Journal covers over the years

Журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», опираясь на историческое наследие, продолжает поддерживать отечественную железнодорожную науку, которая сталкивается с новыми вызовами и одновременно открывает для себя все новые окна возможностей. Непрерывно подтверждая свой статус ведущего российского научно-технического журнала транспортной отрасли, он теперь должен стать и передовым глобальным изданием. Это требует освоения главных мировых научных площадок, и журнал последовательно реализует данную задачу: он уже индексируется в ВИНТИ РАН, EBSCO, Dimensions, на китайской платформе наукометрических данных Baidu и др. Именно в масштабировании, интеллектуализации и открытости журнал видит свое будущее.

Заключение. История журнала Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта наглядно показывает, что научное издание способно служить не только проводником нового знания от ученых-теоретиков к специалистам-практикам, но и инициировать дискурс и публичную верификацию новых данных, сосредотачивать и направлять лучшие умы на решение наиболее насущных для страны за-

дач. С этой точки зрения журнал призван играть важнейшую роль в железнодорожной науке, популяризируя и организуя ее.

Опыт, научный задел и компетенции, накопленные Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта за более чем вековую историю, позволяют ставить вопрос не только об освоении территории российских железных дорог и пространства 1520, но и о масштабировании научных исследований и разработок на глобальный уровень. Следовательно, журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» ориентирован на продвижение российской железнодорожной науки и бренда ВНИИЖТ в планетарном масштабе, прокладывая новые пути для реализации накопленного научного потенциала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хачатуров Т.С. Задачи и перспективы научно-исследовательской работы на железнодорожном транспорте // Техника железных дорог. 1945. № 10–11. С. 1–2.
2. Иванов И.А. О типах верхнего строения пути на послевоенный период // Техника железных дорог. 1948. № 6. С. 1–5.

3. Хачатуров Т. С. 30 лет научно-исследовательских институтов железнодорожного транспорта // Техника железных дорог. 1945. № 7–8. С. 3–8.
4. Задачи научно-исследовательской работы на железнодорожном транспорте // Техника железных дорог. 1946. № 2–3. С. 1–5.
5. Повысить уровень экономической работы на транспорте // Техника железных дорог. 1950. № 6. С. 1–3.
6. О мероприятиях по укреплению и развитию Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта // Техника железных дорог. 1946. № 5–6. С. 27.
7. От редакции // Техника железных дорог. 1946. № 1. С. 1.
8. Праздник советской науки и техники // Техника железных дорог. 1949. № 4. С. 1–3.
9. Повышать уровень работы редакций журналов // Правда. 1951. 18 сентября (№ 261). С. 1.
10. РГА в г. Самаре. Ф. Р-129. Оп. 1–6. Д. 402. Л. 1–5.
11. Скаков А. И. Об улучшении профилей рельсов // Техника железных дорог. 1952. № 10. С. 13–15.
12. Золотарский А. Ф., Бромберг Б. М. О влиянии грузонапряженности на выбор рельсов разной мощности // Там же. С. 15–17.
13. Козиychук П. Г. Об улучшении профиля рельса // Техника железных дорог. 1952. № 5. С. 15–18.
14. К вопросу об улучшении профиля рельса // Техника железных дорог. 1952. № 10. С. 17–18.
15. Иванов В. А. Железнодорожную науку — на уровень новых задач // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1957. № 4. С. 3–5.
16. Петров А. П. Основные научные проблемы эксплуатации железных дорог СССР и пути их решения // Там же. С. 6–16.
17. Каким читатель желает видеть журнал «Техника железных дорог» // Техника железных дорог. 1950. № 8. С. 31–32.
18. Читательские конференции // Техника железных дорог. 1954. № 4. С. 31.
19. Жилин А. Н. Конференция читателей и авторов журнала «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1958. № 3. С. 60.
20. Консультация // Техника железных дорог. 1950. № 2. С. 33.
21. Консультация // Техника железных дорог. 1950. № 5. С. 30.
22. Протокол заседания редколлегии от 5 марта 1954 г. // РГА в г. Самаре. Ф. Р-129. Оп. 1–6. Д. 560. Л. 1–8.
23. Протокол заседания редколлегии от 20 мая 1954 г. // Там же. Л. 9–11.
24. Протокол заседания редколлегии от 2 июля 1956 г. // РГА в г. Самаре. Ф. Р-129. Оп. 1–6. Д. 670. Л. 1–9.
5. Povysit' uroven' ekonomicheskoy raboty na transporte [Raise the level of economic work in transport]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(6):1-3. (In Russ.).
6. O meropriyatiyakh po ukrepleniyu i razvitiyu Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [On measures to strengthen and develop the All-Union Railway Research Institute]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1946;(5-6):27. (In Russ.).
7. Ot redaktsii [Editor's note]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1946;(1):1. (In Russ.).
8. Prazdnik sovetской nauki i tekhniki [Celebration of Soviet science and technology]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1949;(4):1-3. (In Russ.).
9. Povyshat' uroven' raboty redaktsiy zhurnalov [Raise the level of work of editorial offices of journals]. *Pravda*. 1951;(261):1. (In Russ.).
10. RGA v g. Samare [State archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 402. L. 1–5. (In Russ.).
11. Skakov A. I. Ob uluchshenii profiley rel'sov [Improvement of rail profiles]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(10):13-15. (In Russ.).
12. Zolotarskiy A. F., Bromberg B. M. O vliyaniy gruzonapryazhenosti na vybor rel'sov raznoy moshchnosti [On the influence of load density on the choice of rails of different power]. *Ibid.*:15-17. (In Russ.).
13. Koziyuchuk P. G. Ob uluchshenii profilya rel'sa [On improving the rail profile]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(5):15-18. (In Russ.).
14. K voprosu ob uluchshenii profilya rel'sa [On the issue of improving the rail profile]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(10):17-18. (In Russ.).
15. Ivanov V. A. Zheleznodorozhnuyu nauku — na uroven' novykh zadach [Railway science — to the level of new challenges]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Bulletin of the All-Union Railway Research Institute*. 1957;(4):3-5. (In Russ.).
16. Petrov A. P. Osnovnye nauchnye problemy ekspluatatsii zheleznykh dorog SSSR i puti ikh resheniya [Main scientific problems of operation of railways in the USSR and ways to solve them]. *Ibid.*:6-16. (In Russ.).
17. Kakim chitatel' zhelaet videt' zhurnal "Tekhnika zheleznykh dorog" [How the reader wants to see the Railways Technology Journal]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(8):31-32. (In Russ.).
18. Chitatel'skie konferentsii [Reader's conferences]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1954;(4):31. (In Russ.).
19. Zhilin A. N. Konferentsiya chitateley i avtorov zhurnala "Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta" [Conference of readers and authors of the Bulletin of the All-Union Railway Research Institute]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Bulletin of the All-Union Railway Research Institute*. 1958;(3):60. (In Russ.).
20. Konsul'tatsiya [Consultation]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(2):33. (In Russ.).
21. Konsul'tatsiya [Consultation]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(5):30. (In Russ.).
22. Protokol zasedaniya redkollegii ot 5 marta 1954 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of March 5, 1954]. RGA v g. Samare [Russian State Archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 560. L. 1–8. (In Russ.).
23. Protokol zasedaniya redkollegii ot 20 maya 1954 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of May 20, 1954]. *Ibid.* L. 9–11. (In Russ.).
24. Protokol zasedaniya redkollegii ot 2 iyulya 1956 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of July 2, 1956]. RGA v g. Samare [Russian State Archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 670. L. 1–9. (In Russ.).

REFERENCES

1. Khachaturov T. S. Zadachi i perspektivy nauchno-issledovatel'skoy raboty na zheleznodorozhnom transporte [Tasks and prospects of scientific research work on railway transport]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1945;(10–11):1-2. (In Russ.).
2. Ivanov I. A. O tipakh verkhnego stroeniya puti na poslevoennyi period [On the types of the upper structure of the track for the post-war period]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1948;(6):1-5. (In Russ.).
3. Khachaturov T. S. 30 let nauchno-issledovatel'skikh institutov zheleznodorozhnogo transporta [30 years of railway transport scientific research institutes]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1945;(7–8):3-8. (In Russ.).
4. Zadachi nauchno-issledovatel'skoy raboty na zheleznodorozhnom transporte [Tasks of research work on railway transport]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1946;(2–3):1-5. (In Russ.).
5. Povysit' uroven' ekonomicheskoy raboty na transporte [Raise the level of economic work in transport]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(6):1-3. (In Russ.).
6. O meropriyatiyakh po ukrepleniyu i razvitiyu Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [On measures to strengthen and develop the All-Union Railway Research Institute]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1946;(5-6):27. (In Russ.).
7. Ot redaktsii [Editor's note]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1946;(1):1. (In Russ.).
8. Prazdnik sovetской nauki i tekhniki [Celebration of Soviet science and technology]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1949;(4):1-3. (In Russ.).
9. Povyshat' uroven' raboty redaktsiy zhurnalov [Raise the level of work of editorial offices of journals]. *Pravda*. 1951;(261):1. (In Russ.).
10. RGA v g. Samare [State archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 402. L. 1–5. (In Russ.).
11. Skakov A. I. Ob uluchshenii profiley rel'sov [Improvement of rail profiles]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(10):13-15. (In Russ.).
12. Zolotarskiy A. F., Bromberg B. M. O vliyaniy gruzonapryazhenosti na vybor rel'sov raznoy moshchnosti [On the influence of load density on the choice of rails of different power]. *Ibid.*:15-17. (In Russ.).
13. Koziyuchuk P. G. Ob uluchshenii profilya rel'sa [On improving the rail profile]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(5):15-18. (In Russ.).
14. K voprosu ob uluchshenii profilya rel'sa [On the issue of improving the rail profile]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1952;(10):17-18. (In Russ.).
15. Ivanov V. A. Zheleznodorozhnuyu nauku — na uroven' novykh zadach [Railway science — to the level of new challenges]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Bulletin of the All-Union Railway Research Institute*. 1957;(4):3-5. (In Russ.).
16. Petrov A. P. Osnovnye nauchnye problemy ekspluatatsii zheleznykh dorog SSSR i puti ikh resheniya [Main scientific problems of operation of railways in the USSR and ways to solve them]. *Ibid.*:6-16. (In Russ.).
17. Kakim chitatel' zhelaet videt' zhurnal "Tekhnika zheleznykh dorog" [How the reader wants to see the Railways Technology Journal]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(8):31-32. (In Russ.).
18. Chitatel'skie konferentsii [Reader's conferences]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1954;(4):31. (In Russ.).
19. Zhilin A. N. Konferentsiya chitateley i avtorov zhurnala "Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta" [Conference of readers and authors of the Bulletin of the All-Union Railway Research Institute]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta = Bulletin of the All-Union Railway Research Institute*. 1958;(3):60. (In Russ.).
20. Konsul'tatsiya [Consultation]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(2):33. (In Russ.).
21. Konsul'tatsiya [Consultation]. *Tekhnika zheleznykh dorog = Railways Technology*. 1950;(5):30. (In Russ.).
22. Protokol zasedaniya redkollegii ot 5 marta 1954 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of March 5, 1954]. RGA v g. Samare [Russian State Archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 560. L. 1–8. (In Russ.).
23. Protokol zasedaniya redkollegii ot 20 maya 1954 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of May 20, 1954]. *Ibid.* L. 9–11. (In Russ.).
24. Protokol zasedaniya redkollegii ot 2 iyulya 1956 g. [Minutes of the meeting of the editorial board of July 2, 1956]. RGA v g. Samare [Russian State Archive in Samara]. F. R-129. Op. 1–6. D. 670. L. 1–9. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Борисович КОСАРЕВ,

д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

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), SPIN-код: 4185-4532, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

Игорь Васильевич АНОХОВ,

канд. экон. наук, доцент, начальник научно-издательского отдела, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), SPIN: 1444-3259, Author ID: 260787, <https://orcid.org/0000-0002-1548-08150000-0002-5983-2982>

Игорь Васильевич СИРОТЕНКО,

канд. техн. наук, научный редактор, научно-издательский отдел, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 436299

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, First Deputy of General Director, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya st.), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Olga N. RIMSKAYA,

Cand. of Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Scientific and Educational Complex, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN: 4185-4532, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

Igor V. ANOKHOV,

Cand. of Sci. (Economics), Associate Professor, Head of the Scientific Publishing Department, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN: 1444-3259, Author ID: 260787, <https://orcid.org/0000-0002-1548-08150000-0002-5983-2982>

Igor V. SIROTENKO,

Cand. of Sci. (Engineering), Scientific Editor, Scientific Publishing Department, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 436299

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Борисович КОСАРЕВ. Разработка концепции статьи, формулирование целей, задач, структуры подачи материала (5%).

Ольга Николаевна РИМСКАЯ. Реализация концепции статьи, организация работы в Российском государственном архиве в г. Самаре, концептуальные правки (10%).

Игорь Васильевич АНОХОВ. Поиск архивных документов в Российском государственном архиве в г. Самаре, исследование архива журнала ВНИИЖТ, подготовка содержательной части, обзор истории журнала (55%).

Игорь Васильевич СИРОТЕНКО. Исследование архива журнала ВНИИЖТ, обзор истории журнала, поиск информации о редакционной коллегии 1950-х гг. (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV. Development of the article concept, formulation of goals, objectives, the content structure (5%).

Olga N. RIMSKAYA. Implementation of the article concept, organization of work in the Russian State Archive in Samara, conceptual revisions (10%)

Igor V. ANOKHOV. Search for archival documents in the Russian State Archive in Samara, research of the Russian Railway Science Journal archive, preparation of the content, review of the journal history (55%).

Igor V. SIROTENKO. Research of the Russian Railway Science Journal archive, review of the history of the journal, search for information about the editorial board of the 1950s. (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 29.03.2022, первая рецензия получена 11.04.2022, вторая рецензия получена 20.04.2022, принята к публикации 26.05.2022.

The article was submitted 29.03.2022, first review received 11.04.2022, second review received 20.04.2022, accepted for publication 26.05.2022.

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.

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 одно-временной 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 (AuthorID, 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).



ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ 2022

15-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры



Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта www.publictransportweek.ru



21-23 СЕНТЯБРЯ
МОСКВА

ЦВК ЭКСПОЦЕНТР
WWW.E-TRANSPORT.RU



9 772223 973003