



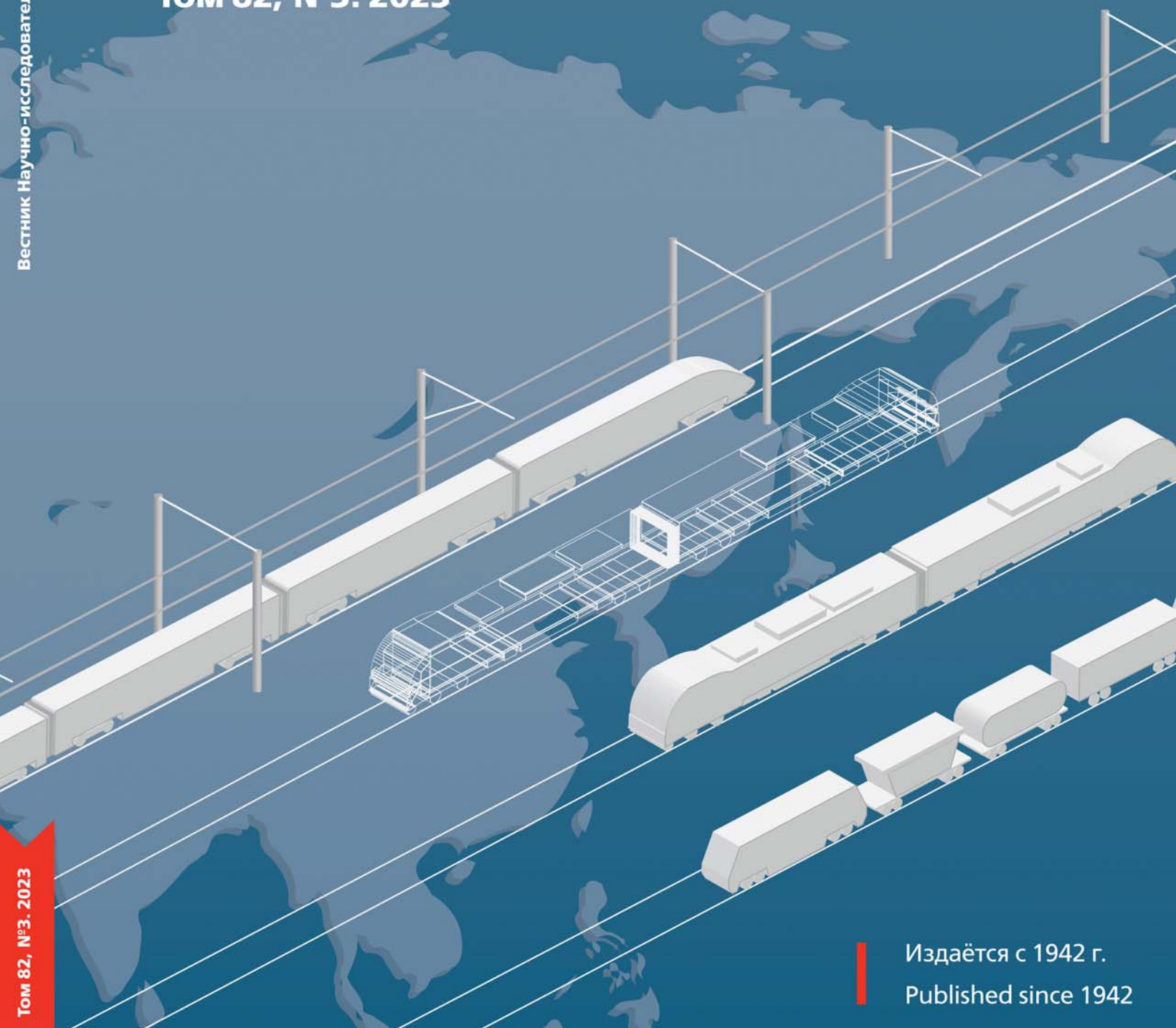
ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 82, №3. 2023



Издаётся с 1942 г.
Published since 1942

Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт



В Санкт-Петербурге прошла II Международная научно-практическая конференция «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт». Мероприятие было включено в деловую программу железнодорожного салона «PRO//Движение.Экспо», где АО «ВНИИЖТ» представил публике экспозицию своих разработок. На стенде института в том числе была представлена подсистема контроля готовности фронта к проведению механизированной выправки пути (КГФ).

Конференция длилась четыре дня и проводилась на двух площадках: в Петербургском государственном университете путей сообщения и на территории PRO//Движение.ЭКСПО.

В конференции приняло участие более 400 посетителей (офлайн и онлайн) из шести стран (Россия, Белоруссия, Иран, Казахстан, Азербайджан, Франция). Было заслушано 124 доклада.

Встреча отраслевых экспертов, организованная Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта, преследовала цель оценить перспективы железнодорожных технологий в эпоху 4-й промышленной революции и глобальных мировых вызовов. Конференция стала площадкой для обмена опытом и идеями, поиска возможных решений проблемных вопросов.

Это уже второе подобное мероприятие, подготовленное АО «ВНИИЖТ», первое состоялось в 2021 году в Москве. В этом году интерес к конференции был настолько высок, что она стартовала за два дня до заявленного срока – с работы секции «Научные аспекты развития процессов в вагонном хозяйстве» в рамках XVII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты».

Основная программа конференции началась 24 августа с работы круглых столов: «Цифровая трансформация на железнодорожном транспорте» и «Железнодорожная инфраструктура в современных условиях».

Глобальные вызовы, стоящие перед современной железнодорожной наукой, обсудили на пленарном заседании. Открыл встречу Анатолий Храмцов — заместитель генерального директора — главный инженер ОАО «РЖД». Также в ходе дискуссии выступили: Сергей Виноградов — генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Владимир Андреев — руководитель Департамента технической политики РЖД, Тамара Титова — первый проректор — проректор по научной работе ФГБОУ ВО ПГУПС, Валерий Косов — генеральный директор АО «ВНИИТИ», Денис Карасев — генеральный директор Центра перспективных технологий ТМХ.

Затем программу продолжили два круглых стола: «Новые транспортные продукты и логистические решения» и «Техническая диагностика на транспорте».

Первым событием второго дня конференции стало заседание Координационного совета

институтов НОК ОАО «РЖД». Среди обсужденных тем: развитие научных школ и открытие совместного диссертационного совета на базе АО «ВНИИЖТ», укрепление взаимодействия молодежных советов, расширение участия институтов в спортивных мероприятиях.

Затем состоялся круглый стол, посвященный перспективам развития железнодорожного транспорта, под названием «Тяговый подвижной состав – взгляд в будущее».

На торжественном закрытии работы конференции были подведены итоги работы секций и награждены лучшие доклады. Среди них:

- «Анализ состояния пути Восточного полигона с применением Цифрового грузового вагона», авторы Игорь Назаров, Дмитрий Горский, Вероника Фёдорова;

- «Сокращение сроков и стоимости проведения работ с помощью верификации и валидации расчетных моделей, используемых в процессе исследований совместно с испытаниями», автор Валерия Шарова;

- «Применение технологий искусственного интеллекта при построении систем предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте», автор Максим Кулагин.



ISSN 2223-9731 (Print)
ISSN 2713-2560 (Online)
DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-3

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 82, № 3. 2023

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

Publisher:
JSC "IPP "KUNA",
47, bldg. 4, Leningradskiy Ave., Moscow, 125167,
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», 2023

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

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

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

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

- 2.5.2. Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.17. Материаловедение (технические науки)
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

ЖУРНАЛ ИНДЕКСИРУЕТСЯ И АРХИВИРУЕТСЯ В:

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)



Международной справочно-библиографической системе EBSCO



Китайской платформе наукометрических данных Baidu



Китайской платформе наукометрических данных
China National Knowledge Infrastructure



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)



Агентства регистрации цифровых идентификаторов (CrossRef)



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



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

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

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

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

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

- 2.5.2. Machine science (technical sciences)
- 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences)
- 2.6.1. Metal science and heat treatment of metals and alloys (technical sciences)
- 2.6.17. Materials science (technical sciences)
- 2.9.2. Railway track, survey and design of railways (technical sciences)
- 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification (technical sciences)
- 2.9.4. Transportation process management (technical sciences)

THE JOURNAL IS INDEXED AND ARCHIVED IN:

Russian Science Citation Index 

EBSCO Information Services 

Baidu 

China National Knowledge Infrastructure (CNKI) 

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 Digital Object Identifier Registration Agency (CrossRef) 

Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License



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

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>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абдурахманов Одил Каландарович, д-р экон. наук, проф., ректор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

Бессоненко Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, СГУПС, Новосибирск, Российская Федерация, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Верескун Владимир Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

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

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

Гуламов Абдулазиз Абдуллаевич, д-р экон. наук, проф., проректор по учебной работе, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

Дунаев Олег Николаевич, д-р экон. наук, проф., заместитель председателя Комитета РСПП по международному сотрудничеству, Москва, Российская Федерация, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

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>

Кудрявцев Сергей Анатольевич, член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук, проф., ДВГУПС, Хабаровск, Российская Федерация, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

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>

Овчаренко Сергей Михайлович, д-р техн. наук, доцент, ректор, ОмГУПС, Омск, Российская Федерация, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

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>

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

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>

Шаумаров Саид Санатович, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и инновациям, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

Шимановский Александр Олегович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

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, д-р техн. наук, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

Лапидус Борис Моисеевич, д-р экон. наук, проф., председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

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

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

Назаров Олег Николаевич, канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

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

Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

РЕДАКЦИЯ

Анохов Игорь Васильевич, начальник научно-издательского отдела, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru, **Сиротенко Игорь Васильевич**, научный редактор, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru, **Смирнова Анна Александровна**, выпускающий редактор, e-mail: smirnova.anna@vniizht.ru

Редина Анна Эдуардовна, специалист, e-mail: redina.anna@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 21.09.2023. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 12. Тираж 300 экз. Заказ 502. Цена свободная

Editor-in-Chief

Alexander B. Kosarev, Dr. Sci. (Eng.), 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. Sci. (Econ.), Associate Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

EDITORIAL BOARD

Odile K. Abdurakhmanov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Rector of the Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

Sergey A. Bessonenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Vladimir D. Vereskun, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

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

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

Abdulaziz A. Gulamov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

Oleg N. Dunaev, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Russian Union of Industrialists and Entrepreneurs, Chairman of Subcommittee for Transport and Logistics, Committee for International Cooperation, Moscow, Russian Federation, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

Mikhail N. Erofeev, Dr. Sci. (Eng.), 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. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Sergey A. Kudryavtsev, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

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

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

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

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

Sergey M. Ovcharenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector of the Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

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

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

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

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

Said S. Shumarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Research and Innovation, Tashkent State Transport University, Uzbekistan, Tashkent, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

Alexandr O. Shimanovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

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

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

EDITORIAL COUNCIL

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

Irina G. Goryacheva, Dr. 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. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of the IATU APC, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

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

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

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

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

Efim N. Rosenberg, Dr. Sci. (Eng.), 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. Sci. (Eng.), Professor of the Wagon Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL STAFF

Igor V. Anokhov, Head of the Scientific Publishing Department, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru,
Igor V. Sirotenko, Scientific Editor, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru, **Anna A. Smirnova**, Publishing Editor, e-mail: smirnova.anna@vniizht.ru,
Anna E. Redina, Specialist, e-mail: redina.anna@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 21.09.2023. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 12 printed sheets. 300 copies. Order No. 502. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирских вагонов А. Н. Балалаев, М. А. Паренюк	189–197
Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам Б. Э. Глюзберг	198–211
Уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения для электровоза М. Ю. Пустоветов	212–223
Оценка возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесах и рельсах с использованием критерия Данг Вана В. И. Сакало, А. В. Сакало	224–235
Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений Е. А. Третьяков, О. В. Балагин, С. А. Живушко	236–245

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК А. С. Ададулов, И. Ю. Савельев, М. А. Чепулис, К. Г. Аринушкина	247–256
Особенности использования индукционного нагрева цилиндрических деталей, сопряженных с осью В. И. Дудин, С. А. Лелехов, А. Н. Фещуков	257–264

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

К вопросу образования и утилизации отходов на объектах железнодорожного транспорта Л. Б. Хайруллина, Н. Л. Мамаева	266–273
--	---------

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Passenger carriages heat insulation tool

Anatoly N. Balalaev, Maria A. Parenjuk 189–197

System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches

Boris E. Gluzberg 198–211

Adjusted computer model of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor with an autonomous voltage inverter for an electric locomotive

Mikhail Yu. Pustovetov 212–223

Assessment of the risk of contact fatigue damage in wheels and rails using the Dang Van criterion

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo 224–235

Improving the operational reliability of electric locomotives by reducing the moisture content of electric traction motor insulation based on electrokinetic phenomena

Evgeny A. Tretyakov, Oleg V. Balagin, Sergei V. Zhivushko 236–245

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the CONLOC system

Aleksandr S. Adadurov, Igor Yu. Savelev, Michael A. Chepulis, Kseniya G. Arinushkina 247–256

Features of induction heating of cylindrical parts conjugated with an axis

Vladimir I. Dudin, Sergey A. Lelekhov, Alexey N. Feshchukov 257–264

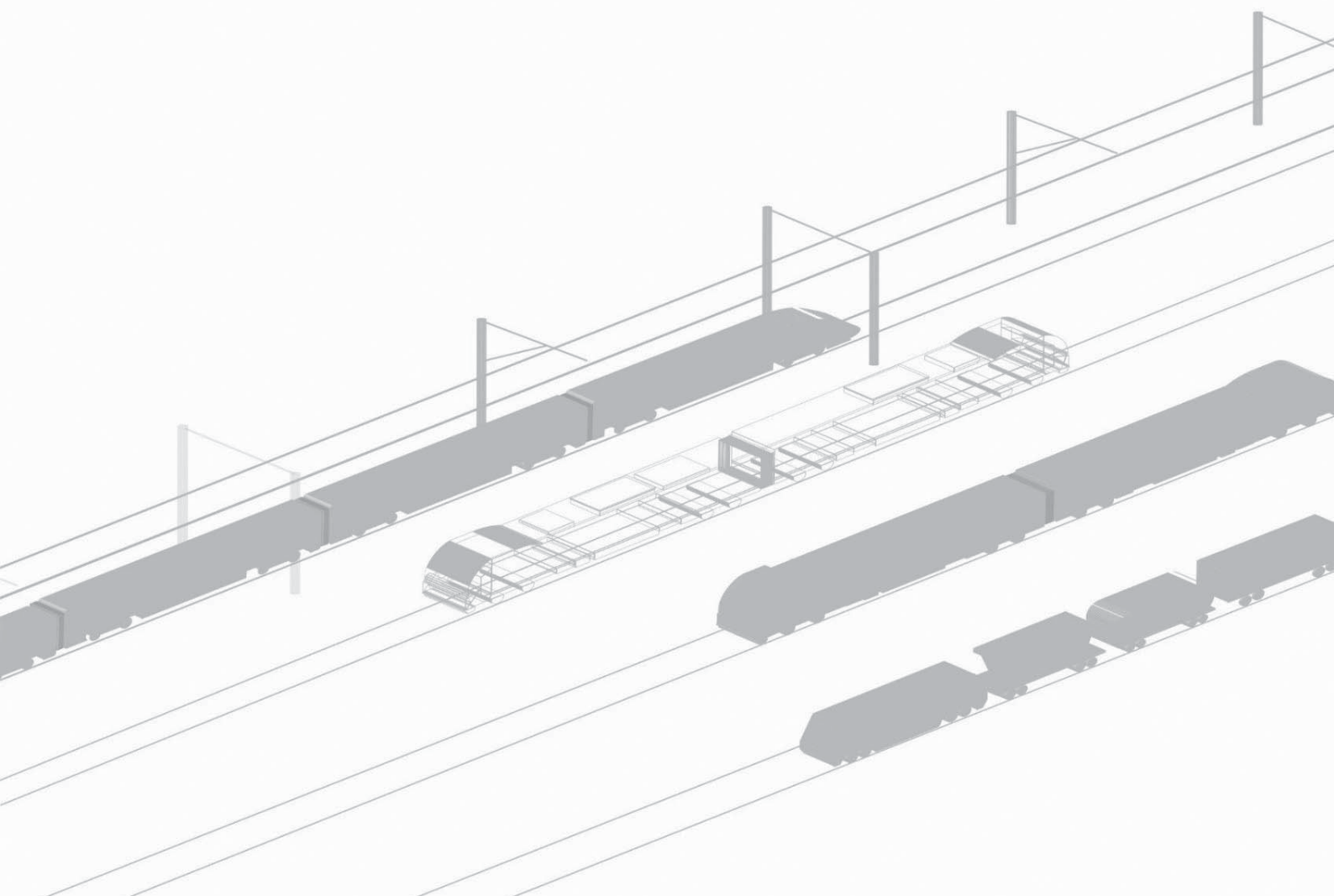
ECONOMICS AND MANAGEMENT

Problem of the waste formation and disposal on the railways

Larisa B. Khairullina, Natali L. Mamaeva 266–273

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



Оригинальная статья

УДК 629.45:536.24.08

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>EDN: <https://elibrary.ru/ryhcqe>

Прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирских вагонов

А. Н. Балалаев✉, М. А. ПаренюкСамарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлена технология оценки качества теплоизоляции кузовов пассажирских вагонов с помощью разработанного переносного прибора. Объектом исследования являются теплоизоляционные характеристики стен кузовов пассажирских вагонов. Качество теплоизоляции оценивается по величине приведенного коэффициента теплопередачи, которая с течением времени эксплуатации повышается, что приводит к увеличению затрат энергии на отопление и кондиционирование внутреннего помещения вагонов. С помощью тепловизора можно составить теплотехнический паспорт вагона с фотофиксацией мест кузова с теплоизоляцией низкого качества. Однако во время капитального ремонта вагона требуется уточнить эти места, измерив локально величину удельного теплового сопротивления стен кузова. Цель исследования заключается в разработке способа определения удельного теплового сопротивления стен кузовов пассажирских вагонов за минимальное время с помощью переносного прибора.

Материалы и методы. Методы исследования сочетают физический эксперимент над участком стены кузова пассажирского вагона и над макетом такой стены с помощью разработанного прибора, а также численный эксперимент над 3D-моделями этих объектов. В частности, для тарировки прибора проводилось исследование по методу конечных элементов нестационарного теплового процесса в цифровой модели прибора и 3D-модели кузова пассажирского вагона с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

Результаты. Доказано, что с помощью переносного прибора возможно определить удельное тепловое сопротивление в локальном месте стены кузова пассажирского вагона за минимальное время – 40 мин.

Обсуждение и заключение. Переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кузов пассажирского вагона, теплоизоляционные характеристики стен, коэффициент теплопередачи, удельное тепловое сопротивление, переносной прибор, виртуальный прибор, нестационарный тепловой процесс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Балалаев А. Н., Паренюк М. А. Прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 189–197. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.45:536.24.08

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>

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



Passenger carriages heat insulation tool

Anatoly N. Balalaev✉, Maria A. Parenjuk

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This is a description of a technology for assessing the quality of thermal insulation of passenger carriages bodies using the portable tool developed. The research focuses on the thermal insulation characteristics of the walls of passenger carriages bodies. Heat insulation is assessed by the reduced heat transfer coefficient which increases during the service life driving up the costs of heating and air-conditioning the car interior. The thermal camera helps create a heat engineering data sheet of the car with photos of the body parts with poor thermal insulation. However, the overhaul of the car requires pinpointing these places by measuring locally the specific thermal resistance of the body walls. The research is intended to develop a method for determining the specific thermal resistance of the walls of passenger carriages bodies in minimal time using a portable tool.

Materials and methods. The research methods are a combination of a physical experiment on a section of the wall of a passenger carriage body and on a model of such wall using the developed tool, as well as a digital experiment on their 3D-models. In particular, the tool calibration involved a finite element analysis of an unsteady thermal process in a digital model of the tool and a 3D-model of the passenger carriage body using SolidWorks Simulation software.

Results. The authors prove that the portable tool can determine the local specific heat resistance in a passenger carriage body wall in minimal time of 40 minutes.

Discussion and conclusion. The portable passenger carriage heat insulation tool can be used for input and output control of thermal insulation of a passenger carriage during a major overhaul.

KEYWORDS: passenger carriage body, wall heat insulation characteristics, heat transfer coefficient, specific thermal resistance, portable tool, virtual tool, unsteady thermal process

FOR CITATION: Balalaev A. N., Parenjuk M. A. Passenger carriages heat insulation tool. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):189-197. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>.

Введение. Пассажирские вагоны российских железных дорог должны обладать теплоизоляционными характеристиками стен кузовов, обеспечивающими величину коэффициента теплопередачи не более $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})^1$. С увеличением эксплуатационной наработки вагонов происходит ухудшение теплоизоляционных характеристик из-за диффузии водяных паров из внутреннего помещения вагона через дефекты пароизоляционного материала в теплоизоляционный материал и впитывания им влаги [1, с. 81]. При этом величина коэффициента теплопередачи стен кузова вагона может за 10 лет эксплуатации повышаться до 10% [1, с. 88]. Увеличение коэффициента теплопередачи приводит к повышению затрат энергии на обогрев внутреннего помещения пассажирского вагона зимой и на кондиционирование летом.

В настоящее время имеются автоматизированные диагностические системы [2, 3], которые позволяют определять дефектные места теплоизоляции стен кузова пассажирского вагона с помощью тепловизора, а затем указывать их в теплотехническом паспорте вагона. При проведении капитального ремонта это дает возможность заменять не всю теплоизоляцию, а только ее дефектные места. Вместе с тем диагностирование стен кузова пассажирского вагона с помощью тепловизора сопряжено с погрешностями, связанными с наличием тепловыделяющих устройств, например водогрейного котла, привода подвагонного электрогенератора и т. п., поэтому перед капитальным ремонтом необходимо уточнить дефектные места теплоизоляции, измерив локально величину удельного теплового сопротивления стен кузова. Зная эту величину, можно рассчитать локальный коэффициент теплопередачи стены и сравнить его значение с нормативной величиной приведенного коэффициента теплопередачи стен кузова, осредненно по площади поверхности кузова.

Нормативный метод измерения приведенного коэффициента теплопередачи стен кузова пассажирского вагона² заключается в установлении стационарного теплового режима, при котором внутри кузова выделяется тепло постоянной мощности и замеряются значения температуры воздушной среды внутри и снаружи вагона. Этот метод отличается большой продолжительностью (до четырех суток) [4, 5] и значительной погрешностью [6, 7], которую учитывают путем включения в итоговое значение приведенного коэффициента теплопередачи расширенной неопределенности его измерения [8].

Проблеме разработки ускоренных методов измерения удельного теплового сопротивления стен кузова транспортного средства посвящено большое количество научных работ, в том числе по пассажирским и изотермическим вагонам, вагонам-рефрижераторам [9–11]. Однако наличие этих методов не привело к созданию удобного прибора для выполнения таких измерений в короткое время. Целью данной работы является разработка способа определения удельного теплового сопротивления стен кузовов пассажирских вагонов за минимальное время с помощью переносного прибора.

Материалы и методы. Предлагаемый переносной прибор, схема установки которого на внутренней стене пассажирского вагона показана на рис. 1, основан на способе определения удельного теплового сопротивления [12]. Согласно данному способу источник тепла с постоянной тепловой нагрузкой подводит тепло к двум эталонным объектам с известной теплопроводностью, один из которых защищен от атмосферного воздуха теплоизоляционной стеной, а другой находится в атмосферном воздухе. По разности темпов нагрева двух эталонных объектов определяется величина удельного теплового сопротивления теплоизоляционной стены исходя из зависимости между величинами тепловых сопротивлений, полученными при замене теплоизоляционной стены на эталонные образцы теплоизоляции с известными величинами коэффициента теплопроводности.

Переносной прибор для измерения удельного теплового сопротивления содержит источник тепловой энергии 3, выполненный в виде двух плоских керамических пластин со спиральным электрическим нагревателем между ними, первый эталонный объект 2, второй эталонный объект 4, первый измеритель температуры 5, второй измеритель температуры 6, третий измеритель температуры 7, электронный блок обработки измерения температуры 8; первый 5, второй 6 и третий 7 измерители температуры соединены с электронным блоком обработки 8, первый 2 и второй 4 эталонные объекты, имеющие большую величину коэффициента теплопроводности, размещены с двух противоположных сторон источника тепловой энергии 3, при этом обеспечивается прохождение одной части теплового потока последовательно через первый эталонный объект 2 и теплоизоляционную стену в окружающую среду, а другой

¹ ГОСТ 34681—2020. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ, 2020. 36 с.

² ГОСТ 33661—2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей: дата введения 2016-10-01. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.

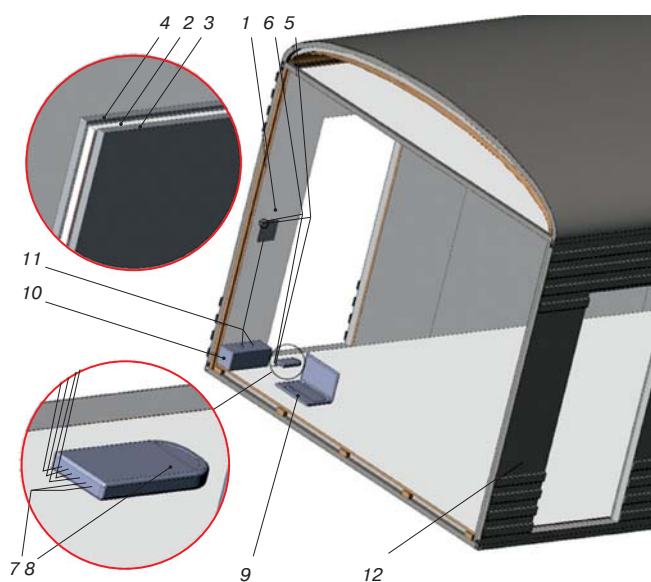


Рис. 1. Схема размещения прибора

для измерения удельного теплового сопротивления на внутренней стене пассажирского вагона:

- 1 — внутренняя стена кузова пассажирского вагона;
2 — первый эталонный объект; 3 — источник тепловой энергии;
4 — второй эталонный объект; 5 — первый измеритель температуры; 6 — второй измеритель температуры; 7 — третий измеритель температуры; 8 — электронный блок обработки измерения температуры; 9 — вычислительное устройство;
10 — автономный источник электрической энергии;
11 — проводники электрического тока; 12 — внешняя стена кузова пассажирского вагона

Fig. 1. Arrangement diagram of the specific thermal resistivity meter on the inner wall of a passenger carriage:

- 1 — inner wall of a passenger carriage body; 2 — first benchmark;
3 — heat source; 4 — second benchmark; 5 — first thermometer;
6 — second thermometer; 7 — third thermometer;
8 — electronic temperature processing unit; 9 — computer;
10 — independent electric power source; 11 — electric wires;
12 — outer wall of a passenger carriage body

части теплового потока через второй эталонный объект 4 в окружающую среду.

Переносной прибор для измерения удельного теплового сопротивления работает следующим образом. Первый эталонный объект 2 прибора своей свободной поверхностью с нанесенной на нее термопастой плотно прислоняется к внутренней стене кузова пассажирского вагона 1 в заданном геометрическом месте кузова. В экспериментах использовалась термопаста КПТ-8 (ГОСТ 19783–74 «Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия»), так как она имеет большую теплопроводность и не является клеем, поэтому может использоваться многократно, не загрязняя контактирующие поверхности. Источник электрической энергии 10 имеет на выходе постоянную электрическую мощность, которая передается по электрическим проводникам 11 источнику тепловой

энергии 3, в котором преобразуется в тепловой поток и разделяется на два тепловых потока: первый поток входит в первый эталонный объект 2, а второй — во второй эталонный объект 4. Первый тепловой поток расходуется на нагрев первого эталонного объекта 2 исследуемой стены кузова пассажирского вагона и выходит в окружающую среду через наружную поверхность стены кузова 12. Второй тепловой поток расходуется на нагрев второго эталонного объекта 4 и выходит в окружающую среду через свободную поверхность второго эталонного объекта. Сигналы от измерителей температуры 5, 6, 7 обрабатываются электронным блоком обработки измерения температуры 8 в виде численных значений температур T_{l_i} , T_{2_i} и T_{h_i} на фиксируемые моменты времени τ_i с некоторым постоянным шагом $\Delta\tau$. С помощью вычислительного устройства 9 определяется разность средних скоростей повышения температуры первого и второго эталонных объектов по формуле

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta\tau} - \frac{\Delta T_2}{\Delta\tau} = \frac{1}{(k-1)\Delta\tau} \left[\sum_{i=1}^{k-1} (T_{l_{i+1}} - T_{h_{i+1}}) - \sum_{i=1}^{k-1} (T_{l_i} - T_{h_i}) - \sum_{i=1}^{k-1} (T_{2_{i+1}} - T_{h_{i+1}}) + \sum_{i=1}^{k-1} (T_{2_i} - T_{h_i}) \right], \quad (1)$$

где k — число измерений температуры первого и второго эталонных объектов.

Чтобы величину, найденную из выражения (1), перевести в безразмерный вид, аналогичные измерения и вычисления выполняются, когда вместо исследуемой стены кузова пассажирского вагона первый эталонный объект 2 своей свободной поверхностью с нанесенной на нее термопастой плотно прислоняется к небольшому по габаритам макету стены кузова пассажирского вагона, составляющие компоненты которого имеют такие же толщины, как и исследуемая стена, но в отличие от нее имеют известные теплотехнические параметры (плотность, удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности). Как и ранее, сигналы от измерителей температуры 5, 6, 7 обрабатываются электронным блоком обработки измерения температуры 8 в виде численных значений температур $T_{l_{0i}}$, $T_{2_{0i}}$ и T_{h_i} на фиксируемые моменты времени τ_i с таким же постоянным шагом $\Delta\tau$. С помощью вычислительного устройства 9 определяется разность средних скоростей повышения температуры первого и второго эталонных объектов по формуле

$$\frac{\Delta T_{l_0}}{\Delta\tau} - \frac{\Delta T_{2_0}}{\Delta\tau} = \frac{1}{(k-1)\Delta\tau} \left[\sum_{i=1}^{k-1} (T_{l_{0i+1}} - T_{h_{i+1}}) - \sum_{i=1}^{k-1} (T_{l_{0i}} - T_{h_i}) - \sum_{i=1}^{k-1} (T_{2_{0i+1}} - T_{h_{i+1}}) + \sum_{i=1}^{k-1} (T_{2_{0i}} - T_{h_i}) \right], \quad (2)$$

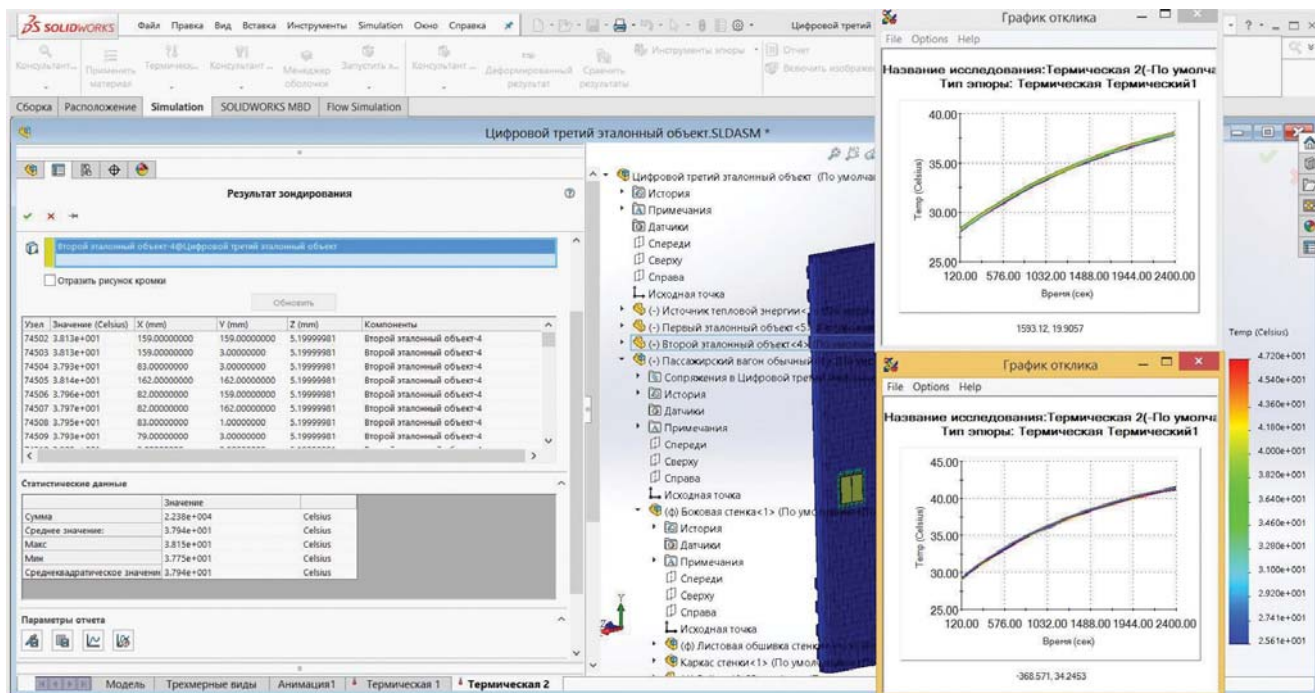


Рис. 2. Результаты исследования в программном комплексе SolidWorks Simulation цифровой модели прибора и 3D-модели кузова пассажирского вагона

Fig. 2. Research results of the digital tool model and the 3D-model of the passenger carriage body in SolidWorks Simulation

где подындекс «0» показывает отношение величин к макету стены кузова пассажирского вагона с известными свойствами.

Как показано в работе [11], удобнее пользоваться безразмерной величиной разности средних скоростей повышения температуры первого и второго эталонных объектов, которая получается делением величины, найденной с помощью выражения (1), на величину, определенную из выражения (2). При этом получается безразмерный комплекс, позволяющий найти удельное тепловое сопротивление стены пассажирского вагона из тарировочной характеристики прибора. Так как объем термопасты, используемой в каждом эксперименте, примерно одинаков, наличие ее теплового сопротивления не приводит к систематической ошибке при получении безразмерного комплекса. Как и в [11], тарировочную характеристику предлагается получить, исследуя виртуальные копии прибора и кузова пассажирского вагона.

Для получения тарировочной характеристики прибора с помощью вычислительного устройства 9 с необходимым программным обеспечением, например ноутбука с программным комплексом SolidWorks Simulation, были выполнены исследования цифровой модели, в которой с одним из нескольких вариантов 3D-модели кузова пассажирского вагона сопряжен

первый цифровой эталонный объект в таком же геометрическом месте, в каком проводилось измерение удельного теплового сопротивления у исследуемой стены. С первым цифровым эталонным объектом сопряжен одной стороной цифровой источник тепловой энергии, с противоположной стороной которого сопряжен второй цифровой эталонный объект. Для цифрового источника тепловой энергии в программном комплексе SolidWorks Simulation задается численное значение мощности теплового выделения. Для свободных поверхностей 3D-модели кузова пассажирского вагона и второго цифрового эталонного объекта, а также торцевых поверхностей первого и второго цифровых эталонных объектов в программном комплексе SolidWorks Simulation задаются коэффициент теплоотдачи и температура окружающей среды. С использованием метода конечных элементов в программном комплексе SolidWorks Simulation проведено нестационарное тепловое исследование, в результате которого получены расчетные зависимости T_1 и T_2 от τ , показанные на рис. 2.

На рисунке представлены результаты исследования варианта 3D-модели кузова пассажирского вагона, у которого значения плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности заданы такими же, как у одноименных параметров макета стены кузова пассажирского вагона. Для этого варианта

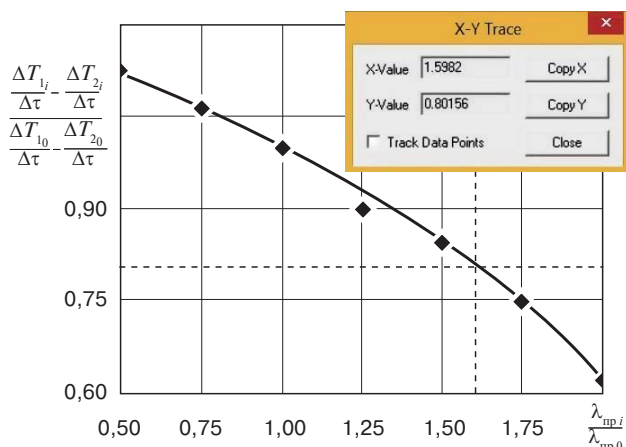


Рис. 3. Тарировочная характеристика прибора
Fig. 3. Tool calibration data

получены значения температуры первого цифрового эталонного объекта T_{1oi} и второго цифрового эталонного объекта T_{2oi} . Значения коэффициентов теплоотдачи и мощности теплового выделения в программном комплексе SolidWorks Simulation подбираются таким образом, чтобы конечные расчетные значения температур T_{1ok} и T_{2ok} совпадали с экспериментальными значениями температур T_{1ok} и T_{2ok} в конечный момент времени τ_k .

В проведенных исследованиях других вариантов 3D-модели кузова пассажирского вагона для теплоизоляционного материала стены задавались другие значения коэффициента теплопроводности и находились значения T_{1i} и T_{2i} .

По расчетным значениям T_{1i} , T_{2i} , T_{1oi} и T_{2oi} с помощью вычислительного устройства 9 определяют разность средних скоростей повышения температуры первого цифрового эталонного объекта и второго цифрового эталонного объекта по формулам (1) и (2). В относительных координатах строится расчетная зависимость между разностью средних скоростей повышения температуры первого цифрового и второго цифрового эталонных объектов и удельным тепловым сопротивлением стены 3D-модели кузова пассажирского вагона.

При построении тарировочной характеристики прибора в относительных координатах в качестве делителя ординаты используется разность средних скоростей повышения температуры первого и второго цифровых эталонных объектов, полученная при исследовании варианта 3D-модели кузова пассажирского вагона, у которого коэффициенты теплопроводности слоев стены совпадают с аналогичными величинами макета стены кузова пассажирского вагона (эталонного варианта). По оси абсцисс тарировочной характеристики откладываем относительную

величину, числителем которой является приведенный коэффициент теплопроводности, рассчитываемый по значениям коэффициента теплопроводности слоев стены 3D-модели кузова пассажирского вагона по формуле

$$\lambda_{np} = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_j}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\delta_j}{\lambda_j} \right)}, \quad (3)$$

где j — текущий номер слоя многослойной стены пассажирского вагона; n — количество слоев стены; δ — толщина слоя, м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К). Знаменатель выражения (3) представляет собой удельное тепловое сопротивление стены, называемое также термическим сопротивлением теплопроводности [1, с. 81].

В качестве делителя (знаменателя) относительной величины, откладываемой по оси абсцисс тарировочной характеристики, используем величину приведенного коэффициента теплопроводности эталонного варианта 3D-модели кузова пассажирского вагона. Вид тарировочной характеристики прибора показан на рис. 3.

Использование тарировочной характеристики прибора, показанной на рисунке, заключается в следующем. Величину безразмерного комплекса, определенную путем деления выражения (1) на выражение (2), откладываем на ординате графика расчетной зависимости (рис. 3), через нее проводим прямую линию, параллельную оси абсцисс, при пересечении этой прямой с кривой тарировочной характеристики на оси абсцисс определяется безразмерная искомая величина. При умножении последней величины на это частное получается величина приведенного коэффициента теплопроводности исследуемого участка стены пассажирского вагона. Если разделить общую толщину стены на найденную величину приведенного коэффициента теплопроводности, то получаем величину удельного теплового сопротивления исследуемого участка стены пассажирского вагона.

Наличие тепловых потерь через торцевые поверхности первого и второго эталонных объектов в физических экспериментах, а также через аналогичные поверхности первого и второго цифровых эталонных объектов в виртуальном эксперименте программного комплекса SolidWorks Simulation не приводит к систематической погрешности, если во всех экспериментах сохраняется одинаковая температура воздушной среды и отсутствует вынужденная конвекция.

Результаты исследования. Для проведения экспериментальных исследований участка стены пассажирского вагона с помощью разработанного

переносного прибора использовался пассажирский вагон № 06316384, находящийся с 2002 г. на полигоне СамГУПС в качестве учебного вагона-лаборатории. Используемый в экспериментах макет стены пассажирского вагона имел размеры 500×500 мм, толщины слоев и материалы, соответствующие параметрам исследуемого пассажирского вагона. Выбор размеров макета стены был обусловлен анализом распределения температуры стены в исследовании цифровой модели прибора и 3D-модели кузова пассажирского вагона с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation. В этих исследованиях на расстоянии 150 мм от краев цифровых эталонных объектов температура стены модели кузова практически не изменяла своего значения с течением времени, т. е. на этом расстоянии была граница распространения тепла вдоль стен модели кузова. Так как первый и второй эталонные объекты прибора, а также их цифровые копии представляли собой квадрат со стороной 160 мм, макет стены должен был представлять собой квадрат со стороной не менее 460 мм.

Исследования стены пассажирского вагона рядом с дверью со стороны отапливаемого тамбура и макета стены позволили получить значение безразмерного комплекса, равное 0,8. Этому значению на тарифовочной характеристике (рис. 3) соответствует значение относительной величины приведенного коэффициента теплопроводности, равное 1,6. Так как в качестве теплоизоляционного материала макета стены пассажирского вагона использовался материал пенополистирол марки ПСБ-С с коэффициентом теплопроводности 0,038 Вт/(м·К), а приведенный коэффициент теплопроводности макета стены составлял 0,05 Вт/(м·К), то приведенный коэффициент теплопроводности исследуемого участка стены пассажирского вагона составил 0,08 Вт/(м·К). При общей толщине стены пассажирского вагона 0,09 м удельное тепловое сопротивление исследуемого участка стены пассажирского вагона составило 1,125 (м²·К)/Вт.

Обсуждение. Использование тарифовочной характеристики прибора для оценки качества теплоизоляции кузова пассажирского вагона, полученной с помощью виртуальных копий прибора и кузова пассажирского вагона, позволило провести измерения каждого исследуемого участка стены кузова пассажирского вагона за время не более 40 мин, как и в исследованиях с помощью стационарного стенда [11], основанного на таком же принципе. Кроме того, для каждой модели пассажирского вагона с теплоизоляцией, которая ранее не исследовалась, необходимо

изготавливать и исследовать макет кузова (боковая стена, торцевая стена, пол, крыша). Следует отметить, что предлагаемый прибор предназначен для измерения локальных теплоизоляционных характеристик стен пассажирского вагона в местах, расположенных на удалении от элементов каркаса кузова (так называемых тепловых мостиков).

Точность прибора зависит от погрешности измерений температур и от систематической погрешности самого метода, лежащего в основе прибора. Оценка погрешности метода измерения удельного теплового сопротивления по способу [12] приведена в работе авторов [11], она составляет менее 5%. Таким образом, суммарная погрешность предлагаемого прибора больше, чем погрешность нормативного метода³, но назначение прибора заключается не в определении общего коэффициента теплопередачи кузова, а в нахождении приведенного коэффициента теплопроводности в локальном месте стены кузова, где будет производиться или произведен капитальный ремонт с заменой теплоизоляции. Для указанной цели важна скорость измерений, поэтому погрешность прибора 5% можно считать приемлемой.

Наличие в составе прибора в качестве источника электроэнергии аккумулятора делает возможным проведение оценки качества теплоизоляции при входном и выходном контроле во время капитального ремонта пассажирского вагона. Экономический эффект от использования такого прибора возможен за счет уменьшения объема ремонтных работ по замене теплоизоляции пассажирского вагона, если оценка качества теплоизоляции кузова пассажирского вагона прибором не подтвердила дефектов, выявленных тепловизором, а также от повышения качества ремонта за счет измерения приведенного коэффициента теплопроводности стены кузова после замены теплоизоляции.

Заключение. В работе представлена конструкция и принцип действия переносного прибора для оценки качества теплоизоляции кузова пассажирского вагона. С помощью этого прибора возможно определить удельное тепловое сопротивление в локальном месте стены кузова пассажирского вагона за минимальное время, так как измерения производятся при нестационарном режиме нагрева двух эталонных объектов, один из которых сопряжен с исследуемой стеной. Для тарировки прибора использовались данные испытаний макета стены пассажирского вагона, у которого толщины слоев и материалы соответствуют аналогичным параметрам стены исследуемого пассажирского вагона, а также результаты исследования

³ ГОСТ 33661–2015.

по методу конечных элементов нестационарного теплового процесса в цифровой модели прибора и 3D-модели кузова пассажирского вагона с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

Переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Левенталь Л. Я., Костин А. В. Энергетика рефрижераторных и пассажирских вагонов: учеб. пособие. М.: МИИТ, 1998. 90 с. [Leventhal L. Ya., Kostin A. V. *Energy of refrigerated and passenger cars: Training manual*. Moscow, MIIT [Russian university of transport (MIIT)]; 1998. 90 p. (In Russ.).]
- Колесников В. И., Алексенко М. В. Мониторинг технического состояния ограждающих конструкций изотермического подвижного состава // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2007. № 1 (25). С. 27–33 [Kolesnikov V. I., Aleksenko M. V. Monitoring of technical condition of isothermal rolling stock enclosing structures. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2007;(1):27-33. (In Russ.).] EDN: https://elibrary.ru/nxqsbd.
- Селезнев А. В., Ворон О. А. Применение тепловизионного контроля ограждающих конструкций вагонов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2. С. 113–116 [Seleznev A. V., Voron O. A. Application of thermal imaging control of railcar enclosing structures. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2013;(2):113-116 (In Russ.).] EDN: https://elibrary.ru/rvqihz.
- Самошкин С. Л., Мейстер А. О., Юхневский М. А. Методические вопросы определения среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 6. С. 344–350 [Samoshkin S. L., Meyster A. O., Yukhnevskiy M. A. Methodical issues of determination of the average heat transfer coefficient of the passenger car body. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(6):344-350. (In Russ.).] http://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-344-350.
- Бороненко Ю. П., Абдуллаев Б. А. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2020. Т. 17, вып. 4. С. 498–513 [Boronenko Yu. P., Abdullaev B. A. Experimental studies of new structural solutions for fencing refrigerated car bodies and containers. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2020;17(4):498-513. (In Russ.).] https://doi.org/10.20295/1815-588x-2020-4-498-513.
- Науменко С. Н., Теймуразов Н. С., Голубин А. А. Точность определения коэффициента теплопередачи // Железнодорожный

транспорт на современном этапе: задачи и пути их решения: сб. ст. молодых ученых и аспирантов / под ред. А. Е. Семечкина. М.: Интекст, 2008. С. 76–79 [Naumenko S. N., Teymurazov N. S., Golubin A. A. Accuracy of determining the heat transfer coefficient. In: Semechkin A. E., ed. *Railway transport at the current stage: problems and ways to solve them: a collection of articles by young scientists and graduate students*. Moscow: Intext; 2008. p. 76–79 (In Russ.).] EDN: https://elibrary.ru/tawhndn.

7. Голубин А. А., Белова Н. В., Науменко С. Н. Влияние погрешностей измерения при определении коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций изотермического вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 2. С. 100–104 [Golubin A. A., Belova N. V., Naumenko S. N. Effect of measurement errors in determining the heat transfer coefficient of the enclosing structures of an isothermal car. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(2):100-104. (In Russ.).] https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-100-104.

8. Давыдов Д. О. Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 4. С. 249–256 [Davydov D. O. Calculation method for the overall heat-transfer coefficient of a technical transport superstructure for perishables in traffic. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(4):249-256. (In Russ.).] https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256.

9. Теймуразов Н. С., Науменко С. Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2009. № 5. С. 18–21 [Teymurazov N. S., Naumenko S. N. Accelerated methods of evaluating heat transfer coefficient of isothermal rolling stock carbody. *Russian Railway Science Journal*. 2009;(5):18-21. (In Russ.).] EDN: https://elibrary.ru/kwpryl.

10. Науменко С. Н. Энергосбережение при проведении теплотехнических испытаний специализированных транспортных средств // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 4 (54). С. 45–47 [Naumenko S. N. Energy saving during heat engineering tests of specialized vehicles. *Energy saving and water treatment*. 2008;(4):45-47. (In Russ.).] EDN: https://elibrary.ru/kbdofl.

11. Балалаев А. Н., Паренюк М. А. Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 99–108 [Balalaev A. N., Parenuk M. A. Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):99-108. (In Russ.).] https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108.

12. Патент № 2771997 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ измерения удельного теплового сопротивления и устройство для его осуществления: № 2021137171: заявл. 15.12.2021; опубл. 16.05.2022 / Балалаев А. Н., Паренюк М. А. 16 с. [Balalaev A. N., Parenuk M. A. *Patent No. 2771997 Russian Federation, MPK G01N 25/18. Method for measuring specific thermal resistance and device for its implementation: No. 2021137171: appl. 15.12.2021, publ. 16.05.2022*. 16 p. (In Russ.).]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ,

д-р техн. наук, профессор, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 28), Author ID: 267860, https://orcid.org/0000-0003-0839-6858

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК,

канд. техн. наук, доцент, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 267860, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6858>

Maria A. PARENJUK,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ. Методика проведения измерений теплоизоляции вагона, заключающаяся в подаче электроэнергии постоянной мощности на тепловыделяющий элемент, примыкающий одной стороной к исследуемому участку стены кузова пассажирского вагона, и измерении температуры с двух сторон тепловыделяющего элемента каждые две минуты в течение сорока минут, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК. Методика обработки данных реального и виртуального экспериментов (формулы (1) и (2)), а также методика исследования цифровой модели прибора и 3D-модели кузова пассажирского вагона (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV. Method for measuring the thermal insulation of a car by supplying constant electric power to a heating element adjacent to the investigated section of the passenger carriage body wall on one side, and measuring the temperature on both sides of the heating element every two minutes for forty minutes; editing and preparing the text of the manuscript (50%).

Maria A. PARENJUK. Method of processing data from real and virtual experiments (formulas (1) and (2)), and the method for studying the digital model of the tool and a 3D-model of the passenger carriage body (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.06.2023, рецензия от первого рецензента получена 05.07.2023, рецензия от второго рецензента получена 07.07.2023, принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 29.06.2023, first review received 05.07.2023, second review received 07.07.2023, accepted for publication 19.07.2023.

ПОДПИСКА

.....

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

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

Подписной индекс журнала — 70116.

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

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

Оригинальная статья

УДК 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>

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



Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам

Б. Э. Глюзберг✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Скорости движения по стрелочным переводам существенно влияют на пропускную способность линий. В статье рассматриваются подходы к установлению скоростей движения по стрелочным переводам в связи с интенсификацией перевозочного процесса, разработкой новых конструкций подвижного состава, организацией скоростного и высокоскоростного, а также тяжеловесного движения.

Материалы и методы. Скорости движения по стрелочным переводам определяются на основании критериев, оценивающих выполнение требований безопасности, и показателей, характеризующих интенсивность перевозочного процесса. Выполнен анализ критериев, по которым устанавливаются скорости движения при проектировании стрелочных переводов, назначаются скорости движения по стрелочным переводам для конкретных видов подвижного состава, скорости движения по сочетаниям (комбинациям) стрелочных переводов. Рассмотрены методики установления скоростей движения по стрелочным переводам, расположенным в криволинейных участках пути.

Результаты. Приведены данные об ограничении скоростей движения на стрелочных переводах с учетом их фактического состояния. Представлены полученные при испытаниях стрелочных переводов результаты, подтверждающие целесообразность применяемых подходов к установлению скоростей движения по ним.

Обсуждение и заключение. Рассмотренные критерии, требования и методики установления скоростей движения подвижного состава по стрелочным переводам составляют единую систему, позволяющую проектировать стрелочные переводы, устанавливать и лимитировать скорости движения по ним подвижного состава в эксплуатационных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стрелочные переводы, конструкционные скорости, скорости конкретных экипажей, скорости по сочетаниям стрелочных переводов, скорости по переводам в кривых, скорости в зависимости от фактического состояния переводов, критерии установления скоростей

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глюзберг Б. Э. Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 198–211. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>.

✉ glusberg@mail.ru (Б. Э. Глюзберг)

© Глюзберг Б. Э., 2023

Original article

UDK 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>

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



System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches

Boris E. Gluzberg✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Railroad switches velocities significantly affect line throughput capacity. The article examines approaches to establishing railroad switches velocities in connection with intensified traffic, new designs of rolling stock, organisation of fast, high-speed and heavy traffic.

Materials and methods. Railroad switches velocities are determined by safety criteria and traffic intensity. The researcher analysed the criteria for railroad switches velocities design, railroad switches velocities for particular types of the rolling stock, velocities along railroad switches combinations. The author examined methods for establishing velocities along railroad switches in curved sections of the track.

Results. The article provided data on speed limits on railroad switches considering their actual condition and presented railroad switches test results substantiating the speed criteria in use.

Discussion and conclusion. These criteria, requirements and methods for establishing rolling stock railroad switches velocities constitute a unified system for developing railroad switches, establishing and limiting the rolling stock railroad switches velocities under operating conditions.

KEYWORDS: railroad switches, design speeds, speeds of specific cabs, speeds based on railroad switches combinations, railroad switch velocities in curves, speeds depending on the actual railroad switches conditions, speed setting criteria

FOR CITATION: Gluzberg B.E. System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):198-211. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>.

✉ gluzberg@mail.ru (B. E. Gluzberg)

© Gluzberg B. E., 2023

Введение. Устройство пути в местах расположения стрелочных переводов имеет особенности, отличающие эти участки железнодорожного пути от других. Наиболее характерные из этих особенностей — короткие протяженности однородных участков, соизмеримые с длинами баз экипажей; отсутствие переходных кривых; наличие углов в плане на стрелочных переводах с острьями секущего типа (типовое решение на российских железных дорогах); короткие прямые вставки между стрелочными кривыми смежных переводов или их полное отсутствие; отсутствие возвышения наружного рельса кривой (может быть и обратное возвышение); элементы стрелочных переводов, резко изменяющие направление движения колесных пар и тележек (набегания колес на остряки, контррельсы, усовики крестовин).

Наличие этих особенностей приводит к тому, что условия прохождения подвижным составом по стрелочным кривым и их сочетаниям принципиально отличаются от условий движения по кривым перегонных путей. Все это вызывает необходимость решать вопросы назначения скоростей движения подвижного состава по стрелочным переводам по методикам, отличным от методик, применяемых для путей на перегонах и станциях.

Вопросы обоснования методов установления скоростей движения по стрелочным переводам и их сочетаниям приобретают все большее значение в связи с интенсификацией перевозочного процесса, разработкой новых конструкций, организацией скоростного и высокоскоростного, а также тяжеловесного движения [1–4]. Отечественная инженерная школа накопила значительный опыт решения этих задач с учетом конструкций российских стрелочных переводов и особенностей их применения на сети дорог. В настоящее время работы в данном направлении ведутся специалистами ВНИИЖТ [5–7] и Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) [8–12]. Цель настоящей работы — сформировать единую систему требований и подходов к назначению скоростей движения по стрелочным переводам исходя из необходимости обеспечения безопасности, комфортабельности и создания наилучших условий реализации перевозочного процесса.

Скорости движения по стрелочным переводам подразделяются на:

- конструкционные — закладываемые в расчет стрелочного перевода при его разработке;
- скорости для конкретных экипажей — определяемые для каждого типа экипажа при допуске его к

обращению на пути с различной конструкцией верхнего строения;

- скорости по сочетаниям стрелочных переводов в горловинах станций в зависимости от конкретных характеристик плана пути;
- скорости по переводам, имеющим износ, повреждения или отклонения от нормативного состояния.

Конструкционные скорости движения по стрелочному переводу являются исходными данными для его проектирования. Совместно с динамико-кинематическими характеристиками они определяют геометрию стрелочного перевода. Как правило, конструкционные скорости, динамико-кинематические характеристики движения по стрелочному переводу, тип рельса, вид подрельсового основания, конструктивные особенности стрелки и крестовины входят в минимальный набор исходных данных, на основании которых может быть начата разработка стрелочного перевода. Порядок расчетов описан в технической и учебной литературе [1, 7].

Скорости для конкретных экипажей определяют на основе прямых динамико-прочностных испытаний [5, 6]. Критерии установления скоростей приведены в распоряжении ОАО «РЖД»¹.

Скорости по сочетаниям стрелочных переводов в горловинах станций определяются на основе требований нормативной документации по проектированию, строительству, реконструкции или капитальному ремонту пути с учетом фактических возможностей выполнения требований по взаимному положению стрелочных переводов (наличие или отсутствие прямых вставок, их длин и т. д.).

В эксплуатации скорости движения по стрелочным переводам корректируются с учетом их фактического состояния, особенностей их расположения в плане и профиле, износа и наличия дефектов, обусловленных наработкой пропущенного груза.

Конструкционные скорости движения по стрелочным переводам. Стрелочные переводы, как элементы путевой инфраструктуры, должны обеспечивать безопасность движения поездов и необходимые параметры перевозочного процесса, а также комфортабельность пассажиров при поездках по железной дороге. В соответствии с используемыми на железных дорогах России методиками проектирования стрелочных переводов, факторами, ограничивающими конструкционную скорость движения подвижного состава по стрелочному переводу, являются динамико-кинематические характеристики, прочностные параметры, показатели воздействия на пассажиров и грузы, характеристики,

¹ О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 08.11.2016 № 2240р (с изм. от 06.04.2020). URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=675788&ysclid=ll2cj6jssa922629126> (дата обращения: 15.06.2023).

обеспечивающие вписывание расчетного экипажа в стрелочную кривую.

Критерии установления скоростей движения поездов по стрелочным переводам и их сочетаниям можно разбить на группы.

Динамико-кинематические критерии. Проектирование стрелочного перевода начинается с разработки его геометрической схемы. В качестве исходных данных для построения и расчета геометрической схемы используют динамико-кинематические характеристики.

Условия движения подвижного состава по стрелочному переводу оцениваются по величинам кинематических характеристик, возникающих при этом движении: скорости движения, ускорения экипажа, скорости изменения этого ускорения.

Кинематические характеристики движения рассчитываются через радиус-вектор, определяющий положение движущейся точки в каждый момент времени [2]. Он равен

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}, \quad (1)$$

где: $x(t), y(t), z(t)$ — функции, характеризующие изменение положения движущейся точки во времени в системе координат $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.

Необходимые параметры — скорость движения $\vec{V}$, ускорение $\vec{a}$ и скорость его изменения $\vec{\psi}$ в общем виде определяются из соотношений

$$\begin{aligned} \vec{V} &= \frac{d\vec{r}}{dt} = V\vec{\tau}; \vec{a} = \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}(V\vec{\tau}) = \frac{dV}{dt}\vec{\tau} + V\frac{d\vec{\tau}}{dt}; \\ \vec{\psi} &= \frac{d\vec{a}}{dt} = \frac{d}{dt}(a_{\tau}\vec{\tau}) + a_{\tau}\frac{d\vec{\tau}}{dt} + \frac{d}{dt}(V^2)q\vec{n} + \\ &+ V^2\frac{d}{dt}(q)\vec{n} + V^2q\frac{d\vec{n}}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{\tau}, \vec{n}$ — единичные векторы касательной и нормали к траектории движения; $q = 1/R$ — кривизна траектории движения в рассматриваемой точке.

После несложных преобразований скорость изменения ускорения можно разложить на три составляющие по осям естественных координат $(\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b})$:

$$\vec{\psi} = \left(\frac{da_{\tau}}{dt} + V^3q^2 \right) \vec{\tau} + \left(3Va_{\tau}q + V^3\frac{dq}{dl} \right) \vec{n} + (V^3c'q)\vec{b}, \quad (3)$$

где $\vec{b}$ — единичный вектор бинормали; c' — кривизна кривой в плоскости перпендикулярной соприкасающейся к траектории движения (скручивающая кривизна).

Из трех составляющих вектора скорости изменения ускорения для оценки кинематики движения по стрелочным переводам значимым является второе слагаемое — составляющая, действующая в горизонтальном поперечном направлении. При постоянной скорости движения экипажа ($a = 0$) модуль скорости изменения

горизонтального поперечного ускорения экипажа с базой b будет

$$|\psi| = \psi = \frac{V^3}{Rd}. \quad (4)$$

В мировой практике в настоящее время используют в основном две концепции проектирования геометрических схем стрелочных переводов.

В ряде стран (например, во Франции) применяют концепцию, которая исходит из «недостаточности возвышения наружного рельса в стрелочной кривой» (на стрелочном переводе возвышение наружного рельса не устраивается из конструктивных возможностей). Отсутствие возвышения наружного рельса не позволяет скомпенсировать отрицательное действие горизонтальных поперечных сил, что ограничивает допустимую скорость движения по стрелочному переводу. Критериями в данном случае служат нормируемые недостаточность возвышения наружного рельса и скорость его изменения, которые оцениваются по величинам непогашенного ускорения и скорости его изменения.

В большинстве стран, включая Россию, при разработке геометрических схем стрелочных переводов используют подход, основанный на анализе динамико-кинематических параметров движения. При проектировании геометрии стрелочного перевода рассматривают условия движения экипажей, исходя из ускорения, внезапно возникающего при набегании колес на острок j ; непогашенного ускорения при движении по стрелочной кривой γ ; параметров, связанных с потерей кинетической энергии при набегании колеса на острок при входе на стрелочную кривую W_0 и набеганиях на направляющие элементы крестовинного узла W_i [7].

При установлении расчетных скоростей движения конкретных экипажей и проектировании стрелочных переводов для высоких скоростей движения на ответвление дополнительно рассматривается еще скорость изменения непогашенного ускорения ψ на входе в стрелочную кривую (и при движении по ней, если радиус кривой переменный) [2]. Величины этих параметров, используемые в практическом проектировании, каждая страна принимает исходя из своей специфики и опыта эксплуатации.

Опыт проектирования и эксплуатации стрелочных переводов на российских железных дорогах показывает, что для наших условий и нашего подвижного состава следует работать в диапазонах значений этих параметров, приведенных в табл. 1.

Расчетная модель для формирования геометрии стрелочного перевода рассматривает движение точечного экипажа, взаимодействующего с путем по рабочей грани рельсовых элементов на расчетном уровне. Сформированная на основе расчетов по этой

модели геометрическая схема стрелочного перевода является основой для разработки его конструкции.

Фактические величины динамико-кинематических характеристик для типовых стрелочных переводов, используемых на российских железных дорогах, приведены в табл. 2.

Условность такого подхода очевидна. Она определяется несовершенством модели движения,

рассматривающей экипаж как материальную точку либо как жесткую базу экипажа (расстояние между шкворнями тележек).

В действительности экипажи представляют собой протяженные объекты, от размеров которых зависит кинематика движения. Частично недостатки принимаемой при проектировании модели компенсируются анализом скорости изменения ускорения, однако не всегда имеется возможность провести его корректно. Так, например, если стрелочная кривая содержит короткие элементы, длины которых меньше длины базы расчетного экипажа, то возможен случай, когда первая тележка экипажа уже прошла короткий элемент, а вторая еще не вошла на него. Тогда среднее расчетное изменение непогашенного ускорения в кузове экипажа на этом участке будет зависеть не от его геометрии, а только от разницы значений непогашенного ускорения на входе в участок и на выходе из него, а также времени прохода участка базой экипажа.

Несмотря на условности расчета, опыт эксплуатации стрелочных переводов показывает применимость такой модели. Она используется в настоящее время при проектировании стрелочных переводов в диапазоне установленных скоростей подвижного состава, эксплуатируемого на сети дорог ОАО «РЖД» (ранее на сети дорог СССР). Тем не менее конструкционные скорости движения по вновь созданным стрелочным переводам должны подтверждаться динамико-прочностными испытаниями, которые являются в России неотъемлемой частью постановки новых видов стрелочной продукции на производство.

Для стрелочных переводов с вновь разработанными геометрическими схемами в испытаниях, помимо перечисленных параметров, определяют кузовные ускорения в характерных местах кузова подвижной единицы, которые в итоге характеризуют влияние геометрии пути в зоне расположения перевода на комфортабельность пассажиров и грузов при проходе такого стрелочного перевода.

Таблица 1

Динамико-кинематические параметры,
используемые при проектировании стрелочных переводов

Table 1

Dynamic and kinematic parameters in railroad switches design

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Принимаемая величина	Единица измерения
1	Внезапно возникающее при набегании колес на остряк ускорение	j	0,3–0,7	м/с ²
2	Непогашенное ускорение при движении по стрелочной кривой	γ	0,4–0,7	м/с ²
3	Параметр, связанный с потерей кинетической энергии при набегании колеса на остряк	W_0	0,210–0,250	м/с
4	Параметр, связанный с потерей кинетической энергии при набегании на элементы крестовинного узла	W_i	0,4–1,0	м/с
5	Скорость изменения непогашенного ускорения	ψ	0,8 (0,4)*	м/с ³

* Значение, принимаемое при проектировании стрелочных переводов для высокоскоростных магистралей.

* Value assumed in railroad switches designs for high-speed railways.

Таблица 2

Динамико-кинематические характеристики типовых одиночных, обыкновенных стрелочных переводов железных дорог России

Table 2

Dynamic and kinematic characteristics of typical single, and ordinary railroad switches of Russian railways

Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Радиус, м		Конструкционная скорость на ответвление, км/ч	Ускорение, м/с ²		Параметр потери кинетической энергии, м/с
		Стрелка	Переводная кривая		Внезапно возникшее	Непогашенное	
P65	1/9	300,000	200,060	40	0,412	0,617	0,191
P65	1/11	300,000	300,000	50	0,643	0,643	0,225
P65	1/18	961,590	963,380	80	0,514	0,513	0,238
P65	1/22	2800,000/1600,000		120	0,397	0,694	0,223

В качестве примера в табл. 3 приведены результаты измерений ускорений в кузове пассажирского вагона при движении по стрелочным переводам наиболее распространенных типов и марок.

По результатам исследований, проведенных на российских железных дорогах специалистами ВНИИЖГ (Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта) и ВНИИЖТ, ускорения, действующие на пассажира в кузове вагона при движении по стрелочному переводу, не должны превышать $2,0 \text{ м/с}^2$ [1]. При воздействиях, повторяющихся незначительное число раз за поездку, может быть допущено превышение ускорений в кузове вагона до $2,2 \text{ м/с}^2$.

Как видно из приведенных в табл. 3 данных, применение этого критерия подтверждает величины конструкционных скоростей, установленных для стрелочных переводов, на которых проведены измерения. Аналогичное положение имеет место и на стрелочных переводах других российских конструкций.

Скорости движения по стрелочным переводам конкретных экипажей. Допускаемые скорости движения по стрелочным переводам для новых видов подвижного состава определяются по результатам динамико-прочностных испытаний. В ходе динамико-прочностных испытаний определяют прочностные параметры, показатели воздействия на пассажиров и грузы, устойчивость колеса на рельсе, устойчивость рельсошпальной решетки, динамические параметры и ускорения в экипажной части исследуемой подвижной единицы. Поскольку цель таких испытаний заключается в том, чтобы характеризовать экипаж, а не стрелочный перевод, эта тема требует отдельного рассмотрения и в данной работе не исследуется.

Критерии прочности и деформативности. Прочностные характеристики стрелочного перевода определяются в процессе динамико-прочностных испытаний. Прочностные параметры конструкции стрелочного перевода должны удовлетворять требованиям норм безопасности. В качестве характеристик, используемых для сопоставления с критериями прочности, рассматриваются напряжения в кромках подошвы рельсовых элементов стрелочного перевода в наиболее нагруженных сечениях.

Величины допускаемых напряжений в элементах стрелочного перевода не должны превышать значений, приведенных в табл. 4.

Проверка выполнения требований прочности имеет большое практическое значение, так как их выполнение обеспечивает надежность и эксплуатационный ресурс разработанного технического средства.

Следует отметить, что при проведении испытаний используется подвижной состав в состоянии, полностью

Таблица 3

Ускорения в кузове пассажирского вагона при движении по стрелочным переводам

Table 3

Accelerations in a passenger car body in motion along railroad switches

Тип рельса	Марка стрелочного перевода	Скорость, км/ч	Наибольшее ускорение в кузове пассажирского цельнометаллического вагона, м/с^2
Р65	1/9	25	0,9
		40	2,2
		50	2,5
	1/11	25	0,9
		40	1,9
		50	2,2
		60	2,6

Таблица 4

Допускаемые напряжения в основных элементах стрелочного перевода

Table 4

Allowable stresses in the main elements of the railroad switch

№ п/п	Элемент стрелочного перевода	Допускаемое напряжение, МПа
1	Рамный рельс	240
2	Остряк	275
3	Соединительная тяга	125
4	Рельс соединительного пути	240
5	Рельс крестовины	240
6	Крестовина (литая часть)	110
7	Контррельс	330

удовлетворяющем требованиям нормативной документации. В практике эксплуатации, к сожалению, эти требования не всегда выполняются. Специальные исследования, в которых использовался подвижной состав, имеющий сверхнормативные отклонения в состоянии экипажной части (взятый непосредственно из эксплуатации), показали, что воздействие такого подвижного состава вызывает напряжения в элементах стрелочного перевода, превышающие допускаемые значения. Превышение допускаемых значений напряжений приводит к расстройкам рельсовой колеи, отказам рельсовых элементов стрелочного перевода или резкому снижению их ресурса и может угрожать безопасности движения поездов.

Деформации рельсовых элементов под поездной нагрузкой: упругие и остаточные вертикальные и

горизонтальные перемещения, упругие и остаточные изменения ширины рельсовой колеи, изменения размеров желобов, изменение в динамике взаимного положения остряка и рамного рельса, положения стрелочной кривой (ординаты) — на стрелочных переводах нормами безопасности не лимитируются. Однако они важны, так как позволяют рассмотреть возможность возникновения условий для вкатывания колес на рельсовые элементы стрелочного перевода или неправильного их движения, вызывающего сход подвижного состава. Так, например, изменение взаимного положения остряка остряка и рамного рельса при проходе поезда позволяет оценить возможность вкатывания колеса с неблагоприятной формой износа на остряк.

В процессе испытаний измеряются изменения геометрии рельсовой колеи на стрелочном переводе и упругие деформации основных элементов стрелочного перевода, несмотря на то, что нормами безопасности, как уже указывалось, они не лимитируются. Измеренные величины деформаций сопоставляются с аналогичными данными, полученными в ранее проведенных испытаниях. В результате получается характеристика конструкции, которая оценивает способность конструктивных решений обеспечивать на стрелочном переводе долговременную стабильность рельсовой колеи и положения элементов перевода в плане и профиле. При проведении испытаний стрелочных переводов эти данные используются как дополнительные параметры, характеризующие работу конструкции в целом и возможность ее длительной эксплуатации при действующей системе обслуживания.

Вопрос нормирования упругих деформаций элементов стрелочного перевода при проходе по нему подвижного состава неразрывно связан с нормированием допустимых форм и величин износа его рельсовых элементов и колес подвижного состава. Такие исследования проводятся отдельно в рамках специальных работ.

Критерий запаса устойчивости против схода колесной пары с рельсов. Величины вертикальных и горизонтальных поперечных (боковых) сил, передаваемых колесами подвижного состава на рельсовые элементы стрелочного перевода, позволяют судить об устойчивости против схода колесной пары с рельсов и возможности вкатывания колеса на остряк, рельс или сердечник крестовины при противошерстном движении по стрелочному переводу.

В испытаниях на пути для получения этих параметров используются методы измерения вертикальных и горизонтальных поперечных сил с помощью датчиков, размещаемых на шейке рельса (в основном метод Шлупфа), или тензометрической колесной пары. На стрелочных переводах ввиду больших градиентов изменения силового взаимодействия по длине перевода

применение этих методик ограничено. Поэтому для получения величин вертикальных и боковых сил воздействия колес подвижного состава на элементы стрелочного перевода используются системы датчиков, аналогичные методу Шлупфа, но локализованные в конкретных сечениях, где имеет место наибольшее воздействие колес. Места расположения измерительных схем определяются на начальных этапах проведения испытаний и могут существенно изменяться в зависимости от конструкции стрелочного перевода, его фактического расположения в пути и условий движения конкретных экипажей. При этом наибольшие горизонтальные поперечные силы от воздействия колес подвижного состава на рельсовые элементы стрелочных переводов не должны превышать 120 кН.

Для измерения сил, действующих на остряки и крестовины, лабораторией «Стрелочное хозяйство» ВНИИЖТ разработаны специальные тензометрические методы [8], однако ввиду сложности устройства измерительных каналов они применяются в основном при решении специальных задач научного характера. В оценках для определения скоростей движения конкретных видов подвижного состава на стрелочных переводах они не используются.

Критерий сдвига рельсошпальной решетки. При установлении допускаемых скоростей движения подвижного состава по пути рассматривается критерий, обеспечивающий отсутствие возможности сдвигов рельсошпальной решетки.

Испытания стрелочных переводов и по воздействию подвижного состава на стрелочные переводы проводятся ВНИИЖТ несколько десятков лет. Испытания каждой новой конструкции стрелочных переводов проводятся при скоростях движения, до 10–15 % превышающих конструкционные скорости. Сдвиги рельсошпальной решетки на стрелочных переводах имели место при использовании переводов с рельсами легких типов, на деревянных брусках и песчаном балласте. После перехода на железобетонное основание и щебеночный балласт не были получены данные, свидетельствующие об остаточных сдвигах рельсошпальной решетки на стрелочных переводах типа Р65 на щебеночном балласте в пределах движения подвижного состава по ним с конструкционными скоростями. Поскольку анализ возможности реализации конкретных скоростей движения производится в пределах конструкционных скоростей для стрелочных переводов, для современных конструкций он выполняется автоматически.

Критерий воздействия ускорения на пассажиров и грузы. Критерий характеризует комфортабельность езды по стрелочному переводу. В качестве такого критерия используются величины ускорений в кузове пассажирского и грузового вагонов. По результатам

исследований, проведенных на российских железных дорогах специалистами ВНИИЖГ и ВНИИЖТ, для выполнения требований по воздействию на пассажиров и грузы ускорения, действующие в кузове вагона, не должны превышать $2,0 \text{ м/с}^2$ [1].

На одиночных стрелочных переводах массовых конструкций марок 1/11 и 1/9 у большинства видов подвижного состава требования этого критерия выполняются в пределах конструкционных скоростей, установленных для этих переводов. В ряде случаев имеются незначительные превышения (до 10 %), которые могут быть допущены регламентирующими подразделениями ОАО «РЖД».

Скорости движения по сочетаниям стрелочных переводов. Критериями для установления скоростей движения по сочетаниям (комбинациям) стрелочных переводов служат динамико-кинематические характеристики движения — ускорения и скорости их изменения в экипажах, возникающие при проходе этих сочетаний [3]. Ограничивающие величины критериев те же, что и при проходе одиночных стрелочных переводов [4].

Требования по величинам непогашенных и внезапно возникающих ускорений должны быть соблюдены при проектировании стрелочных переводов, поэтому при движении по сочетаниям стрелочных переводов главным фактором, ограничивающим скорость движения экипажа, исходя из требований кинематики движения будут величины скоростей изменения непогашенных ускорений на участке пути, на котором расположены стрелочные переводы.

При определении скоростей движения по сочетаниям стрелочных переводов целесообразно использовать модель, в которой экипаж рассматривается в виде жесткого тела с длиной, равной его базе. Расположение стрелочных кривых смежных стрелочных переводов может быть односторонним и разносторонним, схема движения экипажа по пути на разностороннем участке показана на рис. 1.

Позиция A_1B_1 расположена на стрелочной кривой первого стрелочного перевода (до прохождения прямой вставки f), позиция A_2B_2 расположена на стрелочной кривой второго стрелочного перевода (после прохождения прямой вставки f).

Модуль вектора горизонтального поперечного ускорения середины экипажа в положении A_1B_1 равен $|\vec{a}_1| = a_1 = V^2 / R_1$ и направлен наружу кривой по ходу экипажа. Аналогично модуль вектора горизонтального поперечного ускорения середины экипажа в положении A_2B_2 равен $|\vec{a}_2| = a_2 = V^2 / R_2$.

Характер изменения ускорения между положениями экипажа A_1B_1 и A_2B_2 будет зависеть от соотношения величин базы экипажа b и прямой вставки f . Прямая вставка может быть меньше базы экипажа $b > f$, равна ей $b = f$ и больше базы экипажа $b < f$. В зависимости от длины прямой вставки возможны три варианта

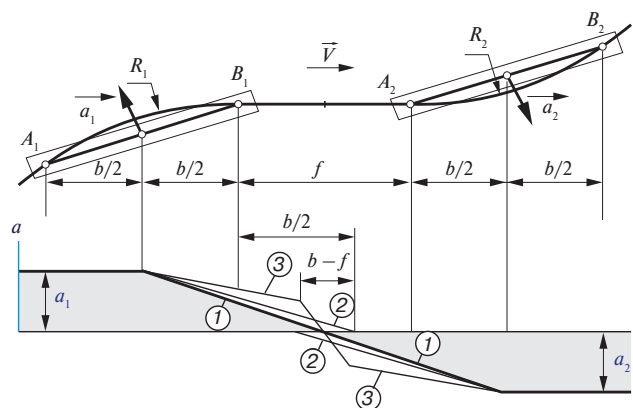


Рис. 1. Движение экипажа по сочетанию стрелочных кривых разностороннего расположения:

A_1B_1 и A_2B_2 — положение жесткой базы экипажа до и после движения по прямой вставке соответственно; 1 — изменение ускорения, принятое в расчете; 2 — изменение ускорения при отсутствии второго перевода; 3 — фактическое изменение ускорения; a_1, a_2 — поперечные ускорения экипажа (векторы); b — база экипажа; f — длина прямой вставки; V — скорость движения экипажа; R_1, R_2 — радиусы первой и второй по ходу экипажа стрелочных кривых соответственно

Fig. 1. Cab movement along a combination of switch curves of lap arrangement:

A_1B_1 и A_2B_2 — the position of the stiff base of the cab before and after moving along a straight insert, respectively; 1 — assumed change in acceleration; 2 — change in acceleration without a second switch; 3 — actual change in acceleration; a_1, a_2 — transverse cab acceleration (vectors); b — cab base; f — straight insert length; V — cab velocity; R_1, R_2 — radiuses of the first and second switch curves along the cab path, respectively

прохода сочетания. Схемы, поясняющие изменение ускорения при проходе сочетания стрелочных переводов в каждом из этих случаев, показаны на рис. 1.

Если принять, что ускорение меняется по линейному закону, то скорость изменения непогашенного ускорения при переходе экипажа из положения A_1B_1 в положение A_2B_2 будет равна отношению величины изменения ускорения к промежутку времени, за который это изменение происходит.

При $b > f$. Изменение ускорения $\Delta a = a_1 + a_2$ произойдет за время Δt , $\Delta t = (b + f) / V$. С учетом этого скорость изменения ускорения за это время будет $\psi = V^3 (R_1 + R_2) / R_1 R_2 (b + f)$. Отсюда

$$V = \sqrt[3]{\psi \frac{R_1 R_2 (b + f)}{(R_1 + R_2)}}. \quad (5)$$

При $b \leq f$. Время, необходимое для входа экипажа в стрелочную кривую, не зависит от длины прямой вставки и определяется длиной базы экипажа: $\Delta t = b / V$. Ускорение меняется за время входа в кривую от нуля до a . Следовательно, $\Delta a = V^2 / R$. Скорость изменения ускорения определяется по выражению $\psi = V^3 / Rb$.

Тогда

$$V = \sqrt[3]{\psi R b}. \quad (6)$$

Схема движения экипажа по пути на участке с односторонним расположением стрелочных кривых показана на рис. 2.

При $b > f$. Если длина прямой вставки меньше базы экипажа, то изменение (уменьшение) непогашенного ускорения начинается после входа экипажа из первой стрелочной кривой на прямую вставку и продолжается, пока центр тяжести экипажа не окажется

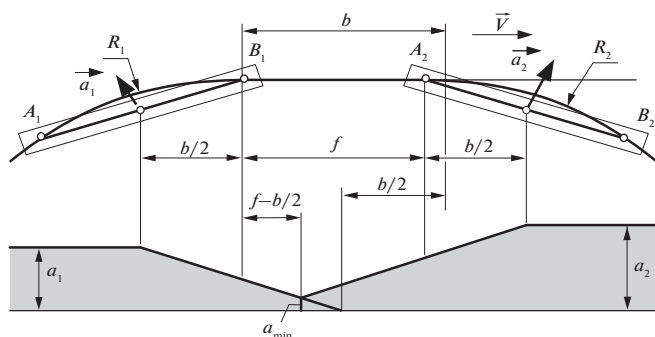


Рис. 2. Движение экипажа по сочетанию стрелочных кривых одностороннего расположения

Fig. 2. Cab movement along a combination of switch curves of one-way arrangement

Таблица 5

Скорости движения по стрелочным переводам марки 1/11 при расположении переднего стыка рамного рельса одного перевода к стыку рамного рельса другого перевода, с односторонним ответвлением путей

Table 5

1/11 grade railroad switches velocities when the stock rail forward joint of one railroad switch is located to the stock rail joint of another railroad switch with one-way branching of the tracks

Прямая вставка, м		Скорость, км/ч		
Между передними стыками	Между остриями острейков	Пассажирский цельнометаллический вагон (база 17 м)	Грузовой полувагон (база 8,65 м)	Короткобазный хоппер (база 6,65 м)
0	2×1,785	45	41	40
0	2×2,765	45	45	41
4,50	10,03	48	46**	42**
6,25 и более	11,78	50*	46**	42**

* Ограничение по конструкционной скорости стрелочного перевода.

** Ограничение связано со стрелочным переводом независимо от сочетания.

* Design railroad switch speed limit.

** The limit is related to the railroad switch regardless of the combination.

в точке на расстоянии $b/2$ от конца прямой вставки: $\Delta a = a_1(1 - f/b)$. Затем начнется увеличение непогашенного ускорения до величины, соответствующей движению по второй стрелочной кривой: $\Delta a = a_2(1 - f/b)$. При одинаковых стрелочных кривых $a_1 = a_2$ оба изменения длятся одинаковое время $\Delta t = f/V$.

Изменение ускорения (с учетом того, что $a = V^2/R$) будет равно $\psi = V^3(1 - f/b)/Rf$. Отсюда

$$V = \sqrt[3]{\psi R \frac{f}{(1 - f/b)}}. \quad (7)$$

При $b \leq f$. Если длина прямой вставки больше или равна базе экипажа, то движение по стрелочным кривым смежных стрелочных переводов с точки зрения кинематики движения независимо. В этом случае скорость движения не зависит от длины прямой вставки и определяется по формуле (6) с подстановкой туда минимального из радиусов R_1 и R_2 .

Проведенный анализ позволяет рассчитать скорости движения экипажей по сочетаниям стрелочных переводов исходя из критериев кинематики движения, размеров прямых вставок и размеров жесткой базы самих экипажей.

В качестве примера в табл. 5 и 6 приведены результаты расчета допускаемых скоростей движения при расположении стрелочных переводов марки 1/11 передними стыками рамных рельсов друг к другу с односторонним и разносторонним ответвлением путей.

При одностороннем ответвлении путей и длине прямой вставки большей, чем база экипажа, кинематика движения по участкам «первая стрелочная кривая — прямая вставка» и «прямая вставка — вторая стрелочная кривая» независима, так как экипаж проходит участок прямой вставки, полностью устанавливаясь на ней. В этом случае расчет скоростей движения нужно проводить по формуле (6). При одностороннем ответвлении путей и длине прямой вставки меньшей, чем база экипажа, скорости его движения по сочетанию, исходя из кинематических требований, должны определяться по формуле (7).

При разностороннем ответвлении путей, как видно из данных табл. 6, скорости движения рассмотренных экипажей на данном виде сочетаний стрелочных переводов по кинематическим требованиям ограничиваются при отсутствии прямых вставок между стрелочными переводами и в случаях, когда длины прямых вставок между переводами меньше, чем 6,25 м. В остальных случаях ограничения связаны с проходом экипажа по самому стрелочному переводу и не зависят от его места расположения в составе сочетания.

Скорости движения по стрелочным переводам в криволинейных участках пути. Фактором, ограничивающим скорости движения по стрелочным переводам в эксплуатационной работе, является использование

обыкновенных стрелочных переводов в криволинейных участках пути и специальных криволинейных стрелочных переводов в кривых с радиусом, отличающимся от проектных величин².

При укладке одиночных обыкновенных стрелочных переводов на криволинейных участках пути необходимо часть кривой основного пути заменить путями стрелочного перевода либо спрямить участок основного пути для укладки на нем стрелочного перевода.

При этом в зависимости от местных условий могут быть использованы следующие способы укладки:

- укладка перевода по касательной к круговой кривой основного пути;
- укладка перевода на спрямленном по хорде участке кривой;
- укладка перевода на спрямленном по касательной участку кривой;
- укладка перевода на спрямленном по секущей участку кривой.

По касательным к круговой кривой основного пути можно укладывать как обыкновенные, так и симметричные одиночные стрелочные переводы. В этом случае стрелочная кривая становится основным направлением движения. Скорости движения по участку пути, в котором расположен стрелочный перевод, в этом случае будут соответствовать конструкционным скоростям движения по стрелочной кривой.

По другим указанным способам укладывают на кривых только обыкновенные одиночные стрелочные переводы. Обобщенная схема укладки одиночного обыкновенного стрелочного перевода на спрямлении кривой показана на рис. 3.

В общем случае при такой укладке стрелочного перевода возникают переходные элементы, содержащие сопрягающие кривые и прямые.

Скорости движения по вновь образованному участку пути определяются исходя из критериев кинематики движения (непревышения непогашенного ускорения и скорости его изменения). Участок включает в себя основную кривую, сопрягающие кривые и прямые, закрестовинную кривую, а в случае движения по ответвлению и стрелочную кривую. Скорости движения экипажей лимитируются минимальным радиусом кривой по направлению движения $R_{\min}$.

Исходя из классических зависимостей при равномерном движении экипажа по участку расположения стрелочного перевода для непогашенного ускорения $a = (V^2 / R) - gh / S$ (где g , h , S — соответственно ускорение силы тяжести, возвышение наружного рельса кривой и ширина рельсовой колеи) и скорости его изменения $\psi = V^3 / Rb$, в случае отсутствия возвышения наружного рельса имеем два возможных варианта.

Таблица 6

Скорости движения по стрелочным переводам марки 1/11 при расположении переднего стыка рамного рельса одного перевода к стыку рамного рельса другого перевода, с разносторонним ответвлением путей

Table 6

1/11 grade railroad switches velocities when the stock rail forward joint of one railroad switch is located to the stock rail joint of another railroad switch with lap branching of the tracks

Прямая вставка, м		Скорость, км/ч		
Между передними стыками	Между острями острьяков	Пассажирский цельнометаллический вагон (база 17 м)	Грузовой полувагон (база 8,65 м)	Короткобазный хоппер (база 6,65 м)
0	2×1,785	47	40	38
0	2×2,765	48	42	41
4,50	10,03	49	46**	42**
6,25 и более	11,78	50*	46**	42**

* Ограничение по конструкционной скорости стрелочного перевода.

** Ограничение связано со стрелочным переводом независимо от сочетания.

* Design railroad switch speed limit.

** The limit is related to the railroad switch regardless of the combination.

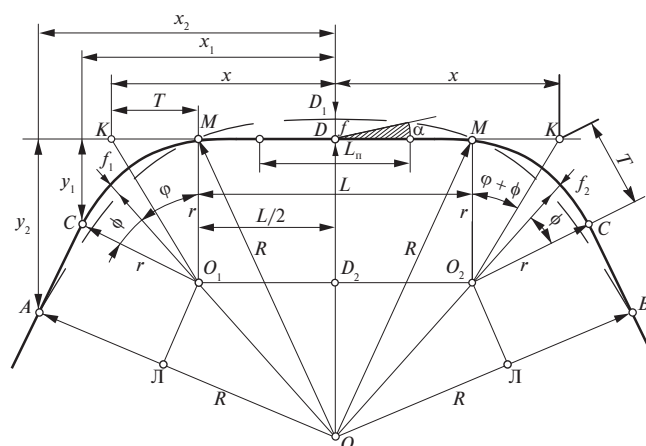


Рис. 3. Укладка одиночного обыкновенного стрелочного перевода на спрямлении кривой (схема разбивки):

R — радиус кривой, в которую уложен стрелочный перевод;
 r — радиус сопрягающей кривой; L_n — стрелочный перевод;
 L — спрямленный участок пути; f, f_1, f_2 — сдвиги оси пути

Fig. 3. Installation of a single ordinary railroad switch on a straightening curve (layout diagram):

R — radius of the curve with the railroad switch inserted;
 r — radius of the connecting curve; L_n — railroad switch;
 L — straightened track section;
 f, f_1, f_2 — track axis shifting

² Инструкция на укладку и эксплуатацию стрелочных переводов, предназначенных для криволинейных участков пути [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 3 декабря 2022 г. № 2433р. URL: <https://base.garant.ru/70434988> (дата обращения: 15.06.2023).

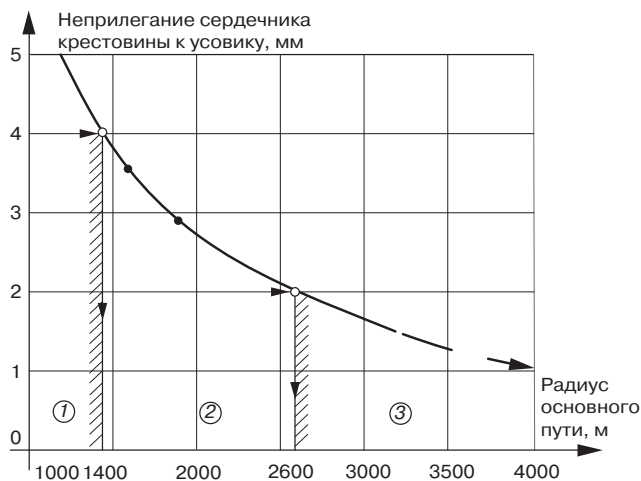


Рис. 4. Возможность использования стрелочных переводов проектов 2726 и 2956 в криволинейных участках высокоскоростных линий:

1 — специальный перевод; 2 — перевод с изменением размеров металлических частей и эпюры; 3 — перевод с проектными размерами и измененной эпюрой

Fig. 4. Possible use of railroad switches of Designs 2726 and 2956 in curved sections of high-speed lines:

1 — special switch; 2 — switch with changes in metal part sizes and diagrams; 3 — switch with design dimensions and modified diagram

В кривых с радиусом $R_{\min} \leq 788$ м ограничивающим фактором будет допускаемая величина непогашенного ускорения $[a]$. В этом случае регламентированная скорость равна

$$V = \sqrt{R_{\min} [a]}. \quad (8)$$

В кривых с радиусом $R_{\min} > 788$ м ограничивающим фактором будет величина скорости его изменения $[\psi]$. Наибольшая допускаемая скорость, соответственно, будет равна

$$V = \sqrt[3]{R_{\min} b [\psi]}. \quad (9)$$

При наличии возвышения наружного рельса (на стрелочном переводе допускается до 75 мм) из того же соотношения для непогашенного ускорения получаем

$$V = \sqrt{R_{\min} \left[[a] - \frac{gh}{S} \right]}. \quad (10)$$

При определении скорости движения по ответвленному пути разностороннего стрелочного перевода следует учитывать возможность понижения наружного рельса переводной кривой вследствие повышения наружного рельса кривой по основному направлению стрелочного перевода. В этом случае помимо расчета по формулам (8) и (9) следует выполнить расчет по формуле (6), подставляя в нее понижение наружной нити (со знаком «—»). В качестве минимального радиуса следует принять наименьший

радиус кривых по боковому направлению стрелочного перевода. В качестве допускаемой следует принимать наименьшую скорость, полученную из расчета по указанным формулам.

В ряде случаев, например для скоростных линий, рассмотренные выше схемы неприемлемы, так как при таких схемах укладки скорости движения по стрелочным переводам в кривых существенным образом ограничиваются. Для скоростных переводов необходимо применять специальные методы вписывания стрелочного перевода в кривую, основанные на корректировке проектных размеров рельсовых элементов и эпюры перевода.

В соответствии с этими методами стрелочный перевод укладывается в кривую без изменения кривизны самой кривой, т. е. радиус основного пути равен радиусу кривой.

Реализация предлагаемого метода позволяет устанавливать по переводу, лежащему в кривой, скорость, величина которой ограничивается только отсутствием возвышения наружного рельса в пределах перевода. В случае укладки перевода по схеме «вираж» (наклон всего перевода) ограничение скорости может вообще не устанавливаться.

Возможности применения этого метода ограничиваются конструктивными особенностями стрелочного перевода. В этом случае необходимо обеспечить нормальную работу всех элементов стрелочного перевода, возможность перемещения и надежной фиксации остриков стрелки и сердечника крестовины, соблюдение допусков содержания для элементов конструкции и перевода в целом.

Принципиально возможны три ситуации:

- металлические части перевода по размерам и геометрии совпадают с проектными, укладка перевода в кривую осуществляется за счет изменения его эпюры;
- для укладки перевода в кривую необходимы изменения геометрических размеров и формы металлических частей, которые можно осуществить без принципиальной переработки проекта;
- применение перевода в кривых невозможно без искажения его геометрии, несовместимого с его нормальной эксплуатацией. При такой ситуации необходимо применять специальные переводы или укладывать перевод на спрямлении.

Для иллюстрации применения этих способов рассмотрим возможность укладки в криволинейные участки пути высокоскоростных стрелочных переводов проектов 2726 и 2956 (рис. 4).

При укладке стрелочных переводов по варианту с проектными размерами и измененной эпюрой для переводов проектов 2726 и 2956 ограничивающими элементами являются крестовина с гибко-поворотным сердечником и рельсовые элементы соединительных путей перевода.

С учетом возможности обеспечения надежной работы стрелочного перевода может быть допущено, что неприлегание сердечника к усовику крестовины составит 2 мм. Как видно из рис. 4, это требование без изменения геометрии металлических частей перевода обеспечивается при укладке стрелочного перевода в кривые с радиусом 2600 м и более. В этом случае требуется только изменение эпюры стрелочного перевода.

При радиусах менее 2600 м необходимо дополнительно производить изгиб короткой ветви сердечника крестовины, корректировать (в сторону уменьшения) длины рубок соединительных путей и ходового рельса ответвленного направления.

Без нарушения работы крестовины и переводного механизма можно допустить «гибы» поворотной ветви сердечника в пределах 4 мм. Из рис. 4 видно, что такой величине «гиба» соответствует радиус кривой 1400 м.

Таким образом, при радиусах кривых в пределах $1400 \text{ м} \leq R \leq 2600 \text{ м}$ переводы могут быть уложены в кривую с радиусом основного пути, равным радиусу кривой, однако при этом кроме изменения эпюры перевода требуется производить «гиб» короткой поворотной ветви сердечника до 4 мм и корректировку длин рельсовых элементов.

Укладка стрелочного перевода в кривые с радиусом более 2600 м, как видно из рис. 4, может быть осуществлена за счет изменения его геометрии в пределах допустимых нормативных отклонений.

Укладка переводов по таким схемам ограничивает скорости по кривой только за счет отсутствия возвышения наружного рельса, а в случае укладки перевода по схеме «вираж», ограничения скорости в кривой из-за наличия в ней стрелочного перевода не требуется:

$$V = V_{\text{кривой}} \quad (11)$$

Скорости движения на ответвленное направление стрелочного перевода соответствуют при этом конструктивным:

$$V = V_{\text{бок}} \quad (12)$$

Для нормальной эксплуатации стрелочных переводов в кривых с минимальным изменением их геометрии и скоростей движения по ним применяются специальные криволинейные стрелочные переводы. Модельный ряд этих переводов предусматривает их укладку в кривые фиксированных радиусов. Поэтому их укладка в кривые с промежуточными значениями радиусов кривизны производится по специальным схемам.

Схемы укладки криволинейных стрелочных переводов в кривые различных радиусов показаны на рис. 5 и 6.

Скорости движения в кривых при использовании этих схем укладки определяются по методикам, аналогичным методикам определения скоростей движения при укладке в кривые обыкновенных

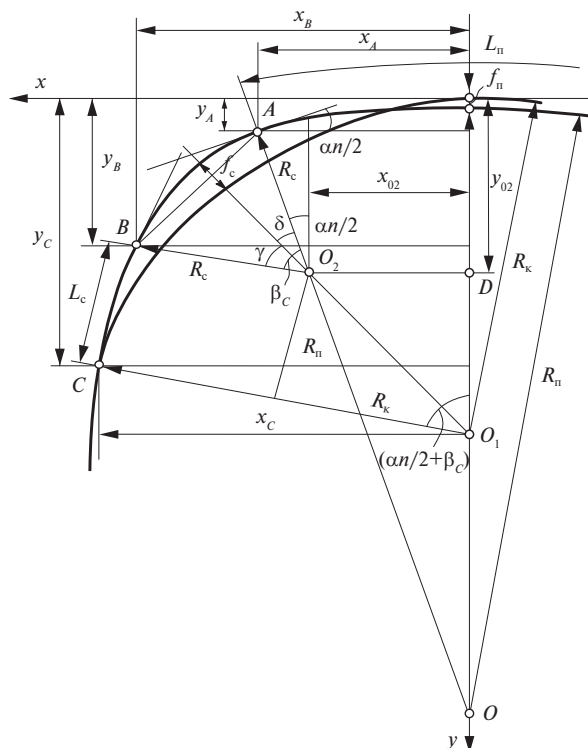


Рис. 5. Схема укладки криволинейного стрелочного перевода в кривую с радиусом, меньше радиуса основного пути перевода: R_k , R_n , R_c — радиусы кривой, в которую уложен стрелочный перевод, кривой основного пути перевода и сопрягающей кривой соответственно; L_n — стрелочный перевод; L_c — спрямленный участок сопряжения; f_c и f_n — сдвиги оси пути

Fig. 5. Scheme for laying a curved railroad switch in a curve with a radius smaller than the radius of the main track of the switch: R_k , R_n , R_c — radius of the curve with the railroad switch inserted, of the main track of the switch, and of the connecting curve, respectively; L_n — railroad switch; L_c — straightened connecting section; f_c and f_n — track axis shifting

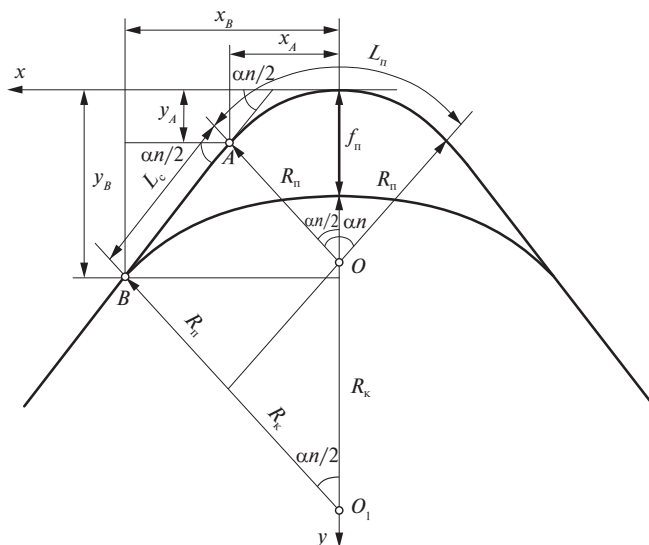


Рис. 6. Схема укладки криволинейного стрелочного перевода в кривую с радиусом, больше радиуса основного пути перевода

Fig. 6. Scheme for laying a curved railroad switch in a curve with a radius bigger than the radius of the main track of the switch

Таблица 7

Скорости движения поездов по стрелочным переводам в зависимости от состояния переводных брусьев

Table 7

Railroad switches velocities depending on the switch sleeper condition

Тип рельсов	Количество негодных брусьев в «кусте»	Направление движения	Допускаемая скорость, км/ч
Р50 и легче	3 4 5 и более	Прямое	40 25 15 или закрытие движения*
	3 4 и более	Боковое	25 15 или закрытие движения*
Р65 и тяжелее	4 5 6 и более	Прямое	40 25 15 или закрытие движения*
	4 5 и более	Боковое	25 15 или закрытие движения*

* Движение закрывается, если ширина колеи превышает 1545 мм или на трех и более деревянных шпалах (брусьев) подряд подошва рельсов выходит из реборд подкладок с наружной стороны колеи.

* Traffic is shut, if the rail gauge exceeds 1545 mm or three or more wooden sleepers (beams) in a row have a rail foot extend from the pad flanges outside the gauge of the line.

стрелочных переводов исходя из нормативов непогащенного ускорения и скорости его изменения по формулам (8) – (10).

Скорости движения по стрелочным переводам в зависимости от фактического состояния их элементов. В практике эксплуатационной работы на стрелочных переводах могут возникать различные расстройства и дефекты, обусловленные высоким уровнем воздействия подвижного состава. Скорости движения по стрелочным переводам, на которых возникли дефекты и расстройства, должны устанавливаться с учетом фактических особенностей состояния их рельсовой колеи, износа, наличия и величин конкретных дефектов.

Практически скорости движения по стрелочным переводам, имеющим различный износ и дефекты металлических частей, устанавливаются в соответствии с Классификацией дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов³, который дифференцирует скорости в зависимости от условий эксплуатации и величин износа и дефектов.

Нормативы скоростей движения в этом документе разработаны по результатам испытаний стрелочных переводов, выполненных ВНИИЖТ, и подтверждены наблюдением за их эксплуатационной работой.

Ограничения скоростей движения вводятся также при наличии на стрелочном переводе неисправных переводных брусьев [13], причем при наличии «куста» неисправных брусьев движение по стрелочному переводу может быть запрещено до устранения причин (см. табл. 7).

Ограничения скоростей движения на стрелочных переводах вводятся при расстройствах и дефектах переводных устройств и систем обеспечения работы переводов. При этом скорости движения по переводам лимитируются требованиями обеспечения безопасности движения подвижного состава по ним.

Обсуждение и заключение. Система критериев, рассмотренная в настоящей статье, дает полную картину работы стрелочных переводов. Рассмотренные критерии и методики охватывают вопросы установления скоростей движения по стрелочным переводам на всех этапах: от разработки конструкции до работы в условиях конкретных горловин станций, в том числе с учетом накопления их расстройств и повреждений в процессе эксплуатации.

Наиболее важными критериями с позиции установления скоростей движения следует считать динамико-кинематические характеристики и критерии, характеризующие прочность конструкции.

Рассмотренные критерии, требования и методики установления скоростей движения подвижного состава по стрелочным переводам составляют единую систему, позволяющую проектировать стрелочные переводы, устанавливать и лимитировать скорости движения по ним подвижного состава в эксплуатационных условиях.

Исследования в области критериев воздействия на пассажиров и грузы целесообразно продолжить, так как в зарубежной практике используются различные значения допускаемых величин ускорений и скоростей

³ Классификация дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-1-93. Каталог дефектов и повреждений стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-2-93. Признаки дефектных и острodefектных элементов стрелочных переводов: утв. приказом МПС России от 27 января 1996 г. М.: Транспорт, 1996. 64 с.

их изменения. Это особенно актуально для высокоскоростного движения, где мы пока не обладаем достаточным опытом.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глюзберг Б.Э. Расчет и проектирование скоростных и стрелочных переводов и съездов. М.: РГОТУПС, 2002. 54 с. [Glyuzberg B. E. *Calculation and design of high-speed and point switches from transfers and exits*. M.: RGOTUPS; 2002. 54 p. (In Russ.).]

2. Расчет скорости движения по боковому пути для пологих марок стрелочных переводов / А. А. Локтев [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 52–56 [Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Berezhovskiy M. E. Calculation of the speed of movement along the side track for flat grades of turnouts. *Transport of the Urals*. 2020;(2):52-56. (In Russ.).]. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2020-2-52-56>.

3. Глюзберг Б.Э. Анализ кинематики прохода подвижных единиц по сочетаниям стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт на современном этапе: 70 лет аспирантуре ОАО «ВНИИЖТ»: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; ред. Б.М. Лапидус, Г.В. Гогричани. М.: ВМГ-Принт, 2014. С. 214–221 [Glyuzberg B. E. Analysis of the kinematics of the passage of moving units by combinations of turnouts. In: Lapidus B. M., Gogrichiani G. V., eds. *Railway transport at the present stage: Proceedings of JSC "VNIIZhT"*. M.: VMG-Print; 2014. p. 214–221. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/swngcb>.

4. Глюзберг Б.Э. Способы повышения пропускной способности горловин станций // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: сб. тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Москва, 20–21 октября 2021 г. М.: РУТ, 2022. С. 114–121 [Glyuzberg B. E. Ways to increase the capacity of the necks of stations. In: *Innovative technologies in railway transport: Proceedings of the scientific and practical conference with international participation, 20–21 October 2021, Moscow*. M.: RUT (MIIT); 2022. p. 114–121. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/bfimyw>.

5. Возможность повышения скоростей движения скоростных и высокоскоростных электропоездов по стрелочным переводам и съездам / А. М. Бржезовский [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 4. С. 217–223 [Brzhezovskiy A. M., Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Il'in I. E., Viktorov V. S., Tulushev V. N. Possibility to increase the speeds of express and high-speed trains by turnouts and connecting tracks. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(4):217-223 (In Russ.).]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-217-223>.

6. Бржезовский А. М., Глюзберг Б. Э., Смелянский И. В. Актуализация норм допускаемых скоростей движения подвижного состава на инфраструктуре ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2017. № 6. С. 26–33 [Brzhezovskiy A. M., Glyuzberg B. E., Smelyanskiy I. V. Actualization of the norms of permissible speeds for the movement of rolling stock on the infrastructure of Russian Railways. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2017;(6):26-33 (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yunwkp>.

7. Желнин Г. Г. Ограничения скоростей движения на стрелочных переводах, уложенных в кривых участках пути // Скорости

движения поездов в кривых: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ; под ред. О. П. Ершкова. М.: Транспорт, 1988. С. 33–39 [Zhelnin G. G. Speed limits on turnouts laid in curved sections of the track. In: Ershkov O. P., ed. *Train speeds in curves: Proceedings of VNIIZhT*. M.: Transport; 1988. p. 33–39. (In Russ.).].

8. Выбор формы переводной кривой стрелочных переводов для высоких скоростей движения / А. А. Локтев [и др.] // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 62–67 [Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Kuskov V. S. The choice of the shape of the transfer curve of turnouts for high speeds. *Transport of the Urals*. 2020;(3):62-67. (In Russ.).]. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2020-3-62-67>.

9. Королев В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 77–87 [Korolev V. V. Modeling turnouts on a slab base. *Science and technology in transport*. 2019;(3):77-87. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xuswpi>.

10. Королев В. В. Информационное моделирование стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 8. С. 37–39 [Korolev V. V. Information modeling of turnouts. *Railway Track and Facilities*. 2022;(8):37-39. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/jjvuvy>.

11. Королев В. В. Стрелочная продукция в эпоху цифрового проектирования // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 6. С. 17–19 [Korolev V. V. Switch products in the era of digital design. *Railway Track and Facilities*. 2023;(6):17-19. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/erfpfe>.

12. Шишкина И. В. Необходимость разработки стрелочных переводов шестого поколения «ГЕКСА» // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 1. С. 16–18 [Shishkina I. V. The need to develop turnouts of the sixth generation "GEXA". *Railway Track and Facilities*. 2022;(1):16-18. (In Russ.).]. EDN: <https://www.elibrary.ru/izzwiv>.

13. Расчет долей дефектных элементов стрелочной продукции / А. А. Локтев [и др.] // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 88–92 [Loktev A. A., Shishkina I. V., Tkachenko V. I., Artem'eva V. V. Calculation of the share of defective elements of the turnout production. *Transport of the Urals*. 2023;(1):88-92. (In Russ.).]. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-88-92>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Boris E. GLUZBERG,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023, рецензия от первого рецензента получена 05.07.2023, рецензия от второго рецензента получена 21.07.2023, принята к публикации 07.08.2023.

The article was submitted 21.06.2023, first review received 05.07.2023, second review received 21.07.2023, accepted for publication 07.08.2023.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.31:621.313.333

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>

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



Уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения для электровоза

М. Ю. Пустоветов✉

Судостроительно-судоремонтный завод «РИФ»,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена задача повышения точности компьютерного моделирования электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя электровоза при частотном регулировании от автономного инвертора напряжения. Уточнен расчет мгновенных значений фазного тока двигателя. Обосновано предложение уточняющих изменений в компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя, позволяющих учесть влияние скин-эффекта в обмотках статора и ротора, а также насыщения магнитной цепи от потоков рассеяния на величины индуктивностей рассеяния фаз и через них — на величины мгновенных значений фазных токов. Актуальность предложенной модели связана с необходимостью повышения надежности вспомогательного электропривода электровоза за счет корректного выбора полупроводниковых ключей инвертора электродвигателя.

Материалы и методы. В качестве метода исследования выбрано компьютерное моделирование с применением системы автоматизированного проектирования OrCAD, при этом в исходных данных размещены экспериментальные мгновенные значения фазных напряжений вспомогательного асинхронного двигателя.

Результаты. Представлены и сопоставлены с экспериментальными данными результаты уточненного компьютерного моделирования мгновенных значений переменных для установившегося режима работы двигателя.

Обсуждение и заключение. На основании сравнения экспериментальных и расчетных данных (тока фазы, вращающего момента, частоты вращения вспомогательного асинхронного двигателя электровоза) сделан вывод о целесообразности применения уточненной компьютерной модели для снижения погрешностей расчета электромагнитных процессов электродвигателя. Уточненная компьютерная модель повышает точность расчета мгновенных значений фазных токов двигателя. Выполнены расчеты для установившегося режима работы асинхронного двигателя типа АЖВ250М2РУХЛ2. Показано, что наибольшее влияние на индуктивность рассеяния обмотки статора оказывает скин-эффект.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, вспомогательный асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, индуктивность рассеяния, ток фазы, насыщение магнитной цепи, скин-эффект, компьютерное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пустоветов М. Ю. Уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов вспомогательного асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения для электровоза // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 212–223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.31:621.313.333

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>

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



Adjusted computer model of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor with an autonomous voltage inverter for an electric locomotive

Mikhail Yu. Pustovetov✉

RIF Shipyard,
Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The author examines the problem of improving the accuracy of computer simulation of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor of an electric locomotive with the frequency adjusted by an autonomous voltage inverter. The calculations of instantaneous motor phase currents were improved. The research justified the proposed adjustments to the computer model of a three-phase asynchronous motor to consider the skin effect in the stator and rotor windings, and the effect of the magnetic circuit saturation from leakage fluxes on the leakage inductance of the phases and, thereby, on the instantaneous phase currents. The model is necessary to enhance the reliability of the auxiliary electric drive of an electric locomotive through the correct selection of semiconductor switches for the electric motor inverter.

Materials and methods. The researcher chose computer simulation using OrCAD as our research method, and the input data include experimental instantaneous phase voltages of the auxiliary asynchronous motor.

Results. The article presents the results of adjusted computer simulations of instantaneous variables for steady-state engine operation and compares them with experimental data.

Discussion and conclusion. The author compared the experimental and calculated data (phase current, torque, rotation speed of the auxiliary asynchronous motor of an electric locomotive) and substantiated the adjusted computer model to reduce errors in the calculation of electromagnetic processes of the electric motor. The adjusted computer model improves the accuracy of calculating the instantaneous phase currents of the motor. The calculations were performed for the steady-state operation of an asynchronous motor of the AZhV250M2RUHL2 type. The results show that the skin effect has the greatest influence on the leakage inductance of the stator winding.

KEYWORDS: AC electric locomotive, auxiliary asynchronous motor, variable frequency electric drive, leakage inductance, phase current, magnetic circuit saturation, skin effect, computer simulation

FOR CITATION: Pustovetov M. Yu. Adjusted computer model of electromagnetic processes of an auxiliary asynchronous motor with an autonomous voltage inverter for an electric locomotive. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):212-223. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-212-223>.

Введение. Асинхронные двигатели (АД) благодаря простоте своей конструкции, отработанной технологии изготовления и надежности в эксплуатации являются, пожалуй, самыми распространенными в мире электрическими машинами [1]. Частотно-регулируемый электропривод (ЧРЭП) с трехфазными АД применяется на электроподвижном составе как в качестве тягового [2], так и вспомогательного [3, 4]. Ввиду относительной простоты механизмов вспомогательного электропривода и небольшого диапазона регулирования рабочих частот вращения двигателя для вспомогательных механизмов на борту электровозов получил распространение ЧРЭП со скалярным регулированием частоты вращения на базе АД с двухуровневым автономным инвертором напряжения (АИН) [4–6]. Например, в составе преобразователя собственных нужд ПСН-169 на борту электровоза переменного тока типа ЭП200 АИН является нагрузкой активного корректора коэффициента мощности [6, 7].

Для анализа режимов работы АД в составе электроприводов принято использовать компьютерное моделирование [1, 8–10]. Эта информационная технология позволяет сократить время на разработку изделий, рассмотреть множество различных вариантов, распознать неудачные технические решения и выбрать приемлемые способы их исправления.

Замечено, что при моделировании процессов в АД в составе ЧРЭП имеются некоторые несоответствия между мгновенными значениями экспериментальной кривой тока и рассчитанной. Это видно, например, из иллюстраций, приведенных в [9, 11], для полученной в результате эксперимента и расчетной кривых тока фазы вспомогательного трехфазного АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 для привода вентилятора. Это двухполюсная электрическая машина с питанием от АИН, номинальной мощностью 110 кВт, с литой короткозамкнутой обмоткой ротора из алюминия, всыпной обмоткой статора из медного провода круглого сечения. Параметры и характеристики этого АД даны в [9]. По сравнению со значениями тока, полученными в результате компьютерного моделирования, экспериментальный ток быстрее нарастает и спадает при коммутациях фазного напряжения, а также имеет несколько большую амплитуду. Вероятной причиной этого является неучет в математических и компьютерных моделях АД [9–11] насыщения магнитной цепи по путям рассеяния, т. е. отличные от фактических значения индуктивностей рассеяния статора и ротора. Аналогичные выводы можно сделать из сравнения полученных в результате эксперимента и компьютерного моделирования кривых тока фазы АД, представленных в работах [12] и [13]. Впрочем, аналогичная разница в поведении токов при питании от АИН присуща также существенно более сложным математическим

моделям АД [14], что видно из графиков тока тягового АД НТА-1200, представленных на рис. 2.18 в работе [14, с. 70]. При использовании результатов моделирования для выбора полупроводниковых приборов АИН по току рекомендовано умножить амплитуду тока, полученного в результате моделирования, на коэффициент, равный 1,30–1,35 [9–11].

Расчетная кривая тока фазы может быть получена с использованием метода гармонического анализа на основе Т-образной схемы замещения фазы АД (рис. 1 [11]).

Метод подробно описан в [2, 15, 16]. В [17] метод уточнен: внесено исправление в расчет электромагнитного момента. Особенностью метода гармонического анализа является то, что действие эффекта вытеснения тока на активные сопротивления и индуктивности схемы замещения учитывается для каждой временной гармоники посредством выражений, описанных в [18]. Насыщение магнитной цепи от основного потока задается постоянным значением коэффициента насыщения. Насыщение магнитной цепи потоками рассеяния не учитывается. Недостатком метода гармонического анализа является его применимость лишь к установившимся режимам работы АД. Причем величина скольжения ротора s задается как одно из исходных данных расчета, оставаясь далее неизменной, не претерпевая никаких колебаний (не предусмотрено решение уравнения движения ротора), что, строго говоря, является идеализированным подходом для большинства режимов работы АД при питании от АИН.

В таблице представлены данные расчета режима работы мотор-вентилятора на базе АД типа АЖВ250М2РУХЛ2, питаемого от АИН при частоте основной гармоники тока статора $f_1 = 48,4$ Гц, полученные разными методами, в сопоставлении с экспериментальными данными (указаны в строке 1). Среднее квадратическое отклонение (СКО) от полученной в результате эксперимента кривой составило 9,91 %. Все значения СКО в таблице нормированы к наибольшему мгновенному значению тока, полученному в эксперименте, за рассматриваемый промежуток времени. Для всех вариантов моделирования и расчета учтено насыщение магнитной системы основным магнитным потоком; при моделировании на основе уравнений, данных в [9], не учтено влияние скин-эффекта на активные сопротивления обмоток; на фазы модели АД подаются кривые напряжения, полученные экспериментальным путем.

Цель работы — предложить уточняющие изменения в компьютерной модели трехфазного АД для повышения точности математического описания электромагнитных процессов при питании от АИН. Изменения модели продиктованы необходимостью

Таблица

Сравнительные характеристики режима работы мотор-вентилятора на базе АД АЖВ250М2РУХЛ2, питаемого от АИН, полученные разными методами

Table

Comparative characteristics of the operating mode of a blower-motor based on asynchronous motor AZhV250M2RUHL2 powered by an autonomous voltage inverter obtained by different methods

№ п/п	Характеристика анализируемого режима	Частота 1-й гармоники питающего напряжения, Гц	Действующее значение 1-й гармоники тока статора, А	Погрешность расчета, %	Среднее значение частоты вращения, об/мин	Погрешность расчета, %	Среднее значение вращающего момента, Н·м	Погрешность расчета, %	Максимальное расчетное значение электромагнитного момента, Н·м	Минимальное расчетное значение электромагнитного момента, Н·м	Коэффициент пульсаций электромагнитного момента, %	СКО расчетной кривой тока фазы от экспериментальной, %
1	Эксперимент	48,4	235,7		2869,5		360,0					
2	Моделирование ^{I)}	48,4	242,3	2,796	2868,6	−0,031	346,7	−3,683	449,8	261,9	27,1	9,58
3	Моделирование ^{II)}	48,4	242,8	2,992	2868,7	−0,028	346,8	−3,663	448,7	264,1	26,6	10,14
4	Моделирование ^{III)}	48,4	236,1	0,180	2872,6	0,108	350,1	−2,756	476,5	232,4	34,9	8,09
5	Моделирование ^{IV)}	48,4	232,4	−1,390	2872,6	0,108	350,1	−2,756	476,5	232,4	34,9	8,13
6	Моделирование ^{V)}	48,4	225,9	−4,186	2875,1	0,195	349,0	−3,050	466,8	246,8	31,5	9,45
7	Моделирование ^{VI)}	48,4	237,6	0,785	2871,3	0,063	348,1	−3,304	460,8	251,4	30,1	8,18
8	Моделирование ^{VII)}	48,4	242,2	2,741	2868,7	0,028	347,2	−3,546	452,8	259,8	27,8	9,21
9	Моделирование ^{VIII)}	48,4	237,3	0,688	2871,3	0,063	347,7	−3,415	460,0	247,5	30,5	8,04
10	Расчет по методу гармонического анализа ^{IX)}	48,4	245,0	3,946	2845,9	0,822	365,0	1,389	441,0	302,0	19,0	9,91

Примечания:

- I) Без учета влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора скин-эффекта и насыщения магнитной цепи.
 II) Отличается от (I) учетом влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи.
 III) С учетом влияния на индуктивность рассеяния только статора: 1) насыщения магнитной цепи; 2) скин-эффекта в функции частоты тока статора $f_1^{-0,16}$.
 IV) Отличается от (III) учетом влияния на индуктивность рассеяния статора скин-эффекта в функции частоты тока статора $f_1^{-0,5}$.
 V) С учетом влияния на индуктивности рассеяния: 1) насыщения магнитной цепи; 2) скин-эффекта в функции частоты тока (для статора $f_1^{-0,16}$ и для ротора $f_2 = (sf_1)^{-0,16}$).
 VI) Отличается от (V) отсутствием влияния на индуктивность рассеяния ротора насыщения магнитной цепи.
 VII) С учетом влияния на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи (отсутствует для ротора до величины тока $1,2\sqrt{2}I_{ном}$).
 VIII) Отличается от (VII) учетом влияния на индуктивности рассеяния скин-эффекта в функции частоты тока в обмотке.
 IX) При расчете по методу гармонического анализа [2, 15–17]: 1) учтено влияние скин-эффекта только на активное сопротивление обмотки ротора; 2) напряжение фазы синтезировано по гармоникам с порядковыми номерами 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97, полученным из разложения экспериментальной кривой фазного напряжения; 3) учтено влияние скин-эффекта на индуктивности рассеяния статора и ротора в пазовых частях обмоток; 4) не учтено влияние на индуктивности рассеяния статора и ротора насыщения магнитной цепи.

Notes:

- I) Disregarding the skin effect and the magnetic circuit saturation in the stator and rotor leakage inductance.
 II) Unlike (I), factors in the effect of the magnetic circuit saturation on the stator and rotor leakage inductance.
 III) With only stator leakage inductance affected by: 1) the magnetic circuit saturation; 2) skin effect as function $f_1^{-0,16}$ of current frequency.
 IV) Unlike (III), factors in the skin effect as a function of the stator current frequency $f_1^{-0,5}$ on stator leakage inductance.
 V) With leakage inductance affected by: 1) the magnetic circuit saturation; 2) skin effect as a function of current frequency ($f_1^{-0,16}$ for the stator and $f_2 = (sf_1)^{-0,16}$ for the rotor).
 VI) Unlike (V), with no effect of the magnetic circuit saturation on the rotor leakage inductance.
 VII) Given the influence of the magnetic circuit saturation on the stator and rotor leakage inductance (absent for the rotor to current $1,2\sqrt{2}I_{ном}$).
 VIII) Unlike (VII), factors in the skin effect as a function of the current frequency in the winding on the leakage inductance.
 IX) Calculated with the harmonic analysis method [2, 15–17]: 1) factors in the skin effect only on the active resistance of the rotor winding; 2) phase voltage synthesised from harmonics 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97 from the expansion of the experimental phase voltage curve; 3) given the skin effect on the stator and rotor leakage inductance in the slotted parts of the windings; 4) disregarding the magnetic circuit saturation in the stator and rotor leakage inductance.

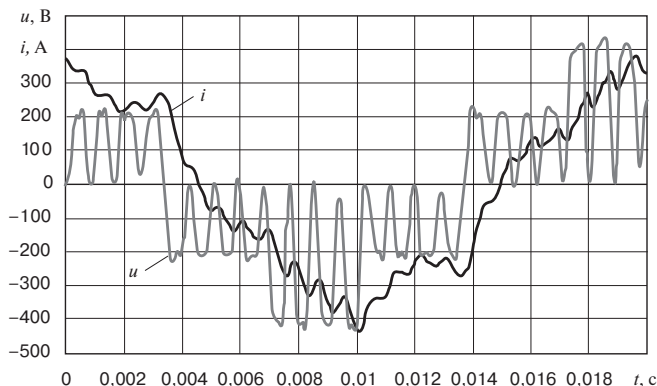


Рис. 1. Расчетные кривые напряжения и тока фазы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 при питании от АИН при частоте основной гармоники тока статора $f_1 = 48,4$ Гц, полученные с использованием метода гармонического анализа. Напряжение синтезировано по гармоникам с порядковыми номерами 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97, полученным из разложения экспериментальной кривой фазного напряжения в ряд Фурье [11]

Fig. 1. Calculated phase voltage and current curves of the AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor powered by an autonomous voltage inverter at the fundamental harmonic frequency of the stator current $f_1 = 48.4$ Hz obtained by harmonic analysis. The voltage is synthesised from harmonics 1, 5, 7, 11, 13, ..., 97 from the Fourier series expansion of the experimental phase voltage curve [11]

повышения надежности вспомогательного электропривода электровозов за счет корректного выбора полупроводниковых ключей АИН.

Постановка задачи. В работах [9, 10] описаны разработанные автором математическая и компьютерная модели трехфазного АД в трехфазных заторможенных координатах, базирующиеся на Т-образной схеме замещения АД и решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и алгебраических уравнений [1], включая уравнение движения ротора. В отличие от метода гармонического анализа математическая модель позволяет рассматривать и переходные, и установившиеся процессы в АД.

Также модель позволяет учитывать явление насыщения магнитной цепи основным магнитным потоком, сцепленным одновременно с магнитопроводами статора и ротора. Модуль мгновенного значения амплитуды изображающего вектора потокосцепления взаимной индукции рассчитывается через ортогональные проекции вектора [8]. Структуры и приемы, апробированные в компьютерной модели [9, 10], реализованной средствами системы автоматизированного проектирования (САПР) OrCAD [19, 20], успешно использованы для разработки моделей АД [21] в среде Matlab [22], которые позволяют учитывать влияние межвитковых замыканий в обмотке статора на режим работы электрической машины.

Сравнивая допущения, принятые в компьютерной модели, с методом гармонического анализа, отметим, что согласно [9, 10] не учитывается влияние

скин-эффекта на активные сопротивления и индуктивности. Насыщение магнитной цепи потоками рассеяния также не учитывается.

Возникают вопросы: 1) как влияют принятые в модели [9, 10] допущения на соответствие моделируемой кривой тока фазы статора АД экспериментально полученной кривой тока при питании от АИН; 2) какие уточнения можно внести в компьютерную модель АД для учета влияния на индуктивности рассеяния скин-эффекта и насыщения от магнитных потоков рассеяния.

В работах [10, 12–14] напряжения, подаваемые на фазы моделируемого АД, формируются при помощи той или иной компьютерной модели АИН, т. е. неизбежно являются идеализированными и несколько отличаются по форме от регистрируемых в ходе эксперимента осциллограмм напряжений. Например, на рис. 1 кривая фазного напряжения АД, используемая в качестве входного сигнала при расчетах, синтезирована на основе усеченного ряда Фурье, из которого отброшены гармонические составляющие порядков выше 97-го, что визуально воспринимается как сглаженная форма импульсов напряжения по сравнению с ожидаемым набором импульсов, форма которых близка к прямоугольной. Использование при моделировании идеальных трапецеидальных импульсов напряжения с очень крутыми фронтами также является отступлением от истины: длительность фронтов зависит от конкретного типа применяемых полупроводниковых ключей; форма трапеции на самом деле криволинейная, поскольку искажается влиянием как процессов коммутации самих ключей, так и влиянием паразитных элементов монтажа преобразователя, случайными процессами электромагнитного взаимодействия с другим оборудованием. Эти обстоятельства позволяют оправдывать расхождение токов фаз АД, получаемых в результате моделирования и эксперимента. Логика проста: поскольку есть различия во входных сигналах (напряжения на фазах АД) при моделировании и эксперименте, то они приведут к различиям выходных сигналов (токов фаз АД). С целью исключения влияния неточности воспроизведения компьютерной моделью АИН деталей формы напряжений, регистрируемых в ходе экспериментов, на результат моделирования токов будем подавать на фазы компьютерной модели АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 осциллограммы напряжений, полученные экспериментально. Такой подход уже использовался автором в иной программной среде [11]. Осциллограммы напряжений и токов АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 получены специалистами ОАО «ВЭЛНИИ» (г. Новочеркасск) в ходе испытаний преобразователя собственных нужд ПСН-169 и опубликованы в [6].

В современных САПР, в частности в OrCAD, существует возможность задать сигнал в виде текстового

файла, содержащего абсциссы и ординаты точек кривой. При необходимости длительного повторения сигнала имеется опция, позволяющая циклически повторять содержимое текстового файла в течение заданного времени. Измерительные системы, получающие данные экспериментов с первичных датчиков-преобразователей, имеют свое программно-аппаратное обеспечение аналого-цифрового преобразования, позволяющее регистрировать результаты измерений, сохраняя их в виде текстовых файлов. Эти текстовые файлы, содержащие координаты зарегистрированных точек кривых физических величин во временной области, чаще всего после некоторых преобразований формата записанных данных используются в качестве текстовых файлов данных, задающих сигнал в компьютерных моделях, разрабатываемых посредством САПР. Такое внесение оцифрованных данных эксперимента (формы экспериментально полученной кривой) в качестве сигнала в компьютерную модель не подразумевает промежуточных операций, способствующих накоплению искажений, как то: распечатка кривой, ручное оцифровывание координат ее точек, ручной ввод данных в текстовый файл. Те же самые цифры, что получены в результате измерений, используются как задающий сигнал напряжений фаз при компьютерном моделировании.

Ответ на первый из поставленных вопросов следует из результатов компьютерного моделирования (таблица, строка 2) — для полученной кривой тока фазы имеем СКО = 9,58 %. С целью снижения СКО внесем уточнения в компьютерную модель АД [9, 10].

Учет насыщения от магнитных потоков рассеяния. Как известно, в электрических машинах кроме главного магнитного потока присутствуют магнитные потоки рассеяния [1]. При степени детализации, присущей вышеупомянутым компьютерным моделям АД [1, 9, 10, 21], следует говорить о магнитных потоках рассеяния фаз обмоток статора и ротора. Уточним, что, например, магнитный поток рассеяния фазы B статора сцеплен исключительно со статором (не проникает через воздушный зазор в ротор) и исключительно с фазой B обмотки статора АД. Если нелинейность кривой намагничивания от основного магнитного потока определяет непостоянство величины главной индуктивности в схеме замещения АД, то нелинейность кривой намагничивания от магнитных потоков рассеяния определяет непостоянство величин индуктивностей рассеяния фаз обмоток статора и ротора АД. Иначе говоря, индуктивность рассеяния фазы обмотки АД зависит от величины тока, протекающего через эту обмотку. В [23] описан случай, когда для одного из типов АД насыщение магнитной системы потоками рассеяния имело определяющее влияние на характеристики режимов работы электрической машины. То есть учет этого явления может быть важен

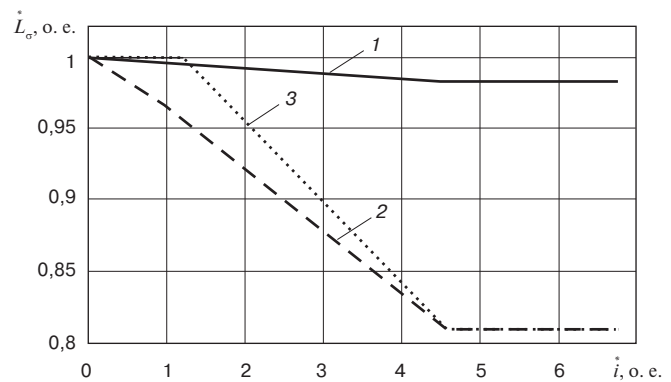


Рис. 2. Нелинейные характеристики, принятые для моделирования индуктивностей рассеяния статора и ротора АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 в относительных единицах:

1 — $\dot{L}_{\sigma 1}(i)$; 2 — начальный вариант $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$;
3 — конечный вариант $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$

Fig. 2. Non-linear characteristics assumed for simulating the stator and rotor leakage inductances of an AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor in relative units:

1 — $\dot{L}_{\sigma 1}(i)$; 2 — initial variant $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$;
3 — final variant $\dot{L}'_{\sigma 2}(i)$

для обеспечения адекватности моделирования процессов в АД.

Как правило (также и в случае АД типа АЖВ250М2РУХЛ2), зависимости индуктивностей рассеяния от тока неизвестны. По рекомендации [23] нелинейность, характеризующая изменение индуктивности рассеяния, должна охватывать режимы работы АД от холостого хода до короткого замыкания. Для АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 известны значения индуктивных сопротивлений статора и ротора в пусковом режиме при синусоидальном напряжении, составляющие соответственно 98,2 и 81,1 % от значений в номинальном режиме, т. е. это значения при $s = 1$. Соглашаясь с [23] в том, что трудно разделить влияние на индуктивность рассеяния явлений насыщения и скин-эффекта, обратим внимание на то, что и в режиме короткого замыкания, и в режиме холостого хода через индуктивность рассеяния статора протекает ток одинаковой частоты. Отсюда следует вывод, что, во всяком случае, в статоре уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния (и прямо пропорционально — индуктивности рассеяния) обусловлено большими величинами пусковых токов, но не частотой тока (не явлением скин-эффекта). Для единообразия такой же подход распространим на приведенную индуктивность рассеяния ротора.

На рис. 2 представлен принятый для моделирования вид нелинейных характеристик индуктивностей рассеяния статора и ротора соответственно. Будем использовать сначала кривые 1 и 2.

Автором в работах [9, 24] приведено описание математической и компьютерной моделей насыщающегося

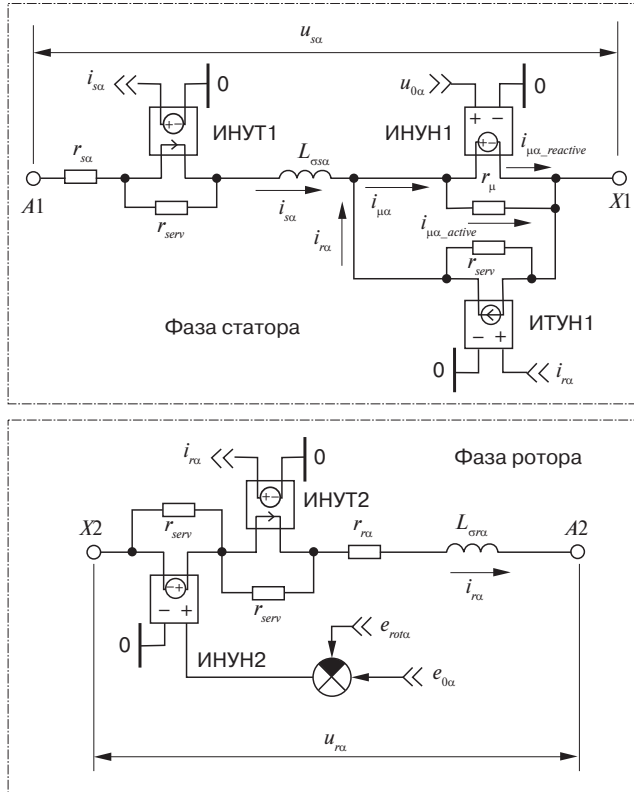


Рис. 3. Графическое изображение исходной (без учета насыщения потоками рассеяния) компьютерной модели фазы *A* обмоток статора и ротора трехфазного АД согласно [9]:

A1 и *X1* — маркировка начала и конца фазы статора; *A2* и *X2* — маркировка начала и конца фазы ротора; u_{sa} — напряжение фазы статора; i_{sa} — ток фазы статора; u_{ra} — напряжение фазы ротора; i_{ra} — ток фазы ротора; u_{0a}, e_{0a} — напряжение и ЭДС намагничивания фазы АД; $i_{\mu a}, i_{\mu a, active}, i_{\mu a, reactive}$ — ток намагничивания фазы, его активная и индуктивная составляющие; e_{rota} — ЭДС вращения фазы; r_{sa}, r_{ra} — активные сопротивления фазы статора и ротора; r_{μ} — сопротивление потерь в стали; $L_{\sigma sa}, L_{\sigma ra}$ — индуктивности рассеяния фазы статора и ротора; параметры ротора традиционно приведены к фазе статора

Fig. 3. Graphic representation of the initial (disregarding saturation with leakage fluxes) computer simulation of Phase *A* of the stator and rotor windings of a three-phase asynchronous motor subject to [9]:

A1 и *X1* — stator phase beginning and end marking; *A2* и *X2* — rotor phase beginning and end marking; u_{sa} — stator phase voltage; i_{sa} — stator phase current; u_{ra} — rotor phase voltage; i_{ra} — rotor phase current; u_{0a}, e_{0a} — voltage and EMF of the magnetising phase of the asynchronous motor; $i_{\mu a}, i_{\mu a, active}, i_{\mu a, reactive}$ — phase magnetising current, its active and inductive components; e_{rota} — EMF of phase rotation; r_{sa}, r_{ra} — active resistances of the stator and rotor phases; r_{μ} — steel loss resistance; $L_{\sigma sa}, L_{\sigma ra}$ — the stator and rotor phase leakage inductances; rotor parameters are traditionally reduced to the stator phase

электрического дросселя. Такой же подход предлагается использовать для учета насыщения магнитными потоками рассеяния индуктивностей обмоток фаз статора и ротора в компьютерной модели трехфазного АД. На рис. 3 показано графическое изображение компьютерной модели фазы *A* обмоток статора и ротора АД согласно [9, 10] (исходный вариант). На рис. 3–5 в качестве датчиков и для ввода сигналов в составе модели АД

использованы элементы типа ИНУН, ИНУТ, ИТУН. В этих сокращениях: И — источник; У — управляемый; Н — напряжение; Т — ток. Например, ИНУТ — источник напряжения, управляемый ток. На рис. 4 и 5, представляющих собой дополненный для учета насыщения от магнитных потоков рассеяния вариант схемы [25], блок ABS выполняет операцию вычисления модуля сигнала. Блок TABLE представляет собой таблицу, в которой заданы значения индуктивности рассеяния (в относительных единицах) в функции мгновенного тока статора. Блок в виде прямоугольника, имеющий внутри обозначение «1,0», является источником постоянного напряжения величиной 1,0 В. Резисторы r_{serv} обладают большим сопротивлением, например 10 МОм. Практически не влияя на численные результаты моделирования, они стабилизируют ход решения за счет сохранения цепи протекания тока (физический смысл — путь протекания токов утечки), что особенно важно при дискретном изменении сопротивления цепей питания АД, например при питании от полупроводникового преобразователя частоты или при обрыве фазы.

Отметим, что резистивные элементы подобного назначения используются другими разработчиками компьютерных моделей электротехнических устройств [26]. Аналогичным образом на рис. 4 учитывается насыщение магнитной цепи потоками рассеяния в фазах ротора АД; дополнив нижнюю часть рис. 3, получаем рис. 5.

По второму закону Кирхгофа для фазы *A* статора и ротора АД (приведена к статору [9, 10]) с учетом [9, 24] можно записать уравнения (1) и (2) соответственно (обозначения по [9, 24] и рис. 3–5):

$$u_{sa} + \Delta L_{\sigma sa}(i_{sa}) \frac{di_{sa}}{dt} = r_{sa} i_{sa} + L_{\sigma sa} \frac{di_{sa}}{dt} + u_{0a}; \quad (1)$$

$$u_{ra} + \Delta L_{\sigma ra}(i_{ra}) \frac{di_{ra}}{dt} = e_{0a} - e_{rota} - L_{\sigma ra} \frac{di_{ra}}{dt} - r_{ra} i_{ra}. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) $\Delta L_{\sigma}(i)$ — мгновенное значение разницы между ненасыщенным и насыщенным значениями индуктивности рассеяния (для рис. 4 и 5), т. е. между постоянным значением L_{σ} , не учитывающим влияние насыщения от потоков рассеяния (относительное значение $L_{\sigma} = 1$ о. е.), и переменным в зависимости от величины протекающего тока значением $L_{\sigma sat}(i)$, учитывающим влияние насыщения от потоков рассеяния (относительное значение $L_{\sigma sat}(i) \leq 1$ о. е.).

Блок TABLE1 на рис. 4 реализует нелинейную зависимость индуктивности рассеяния статора от тока фазы статора согласно кривой 1 на рис. 2. Блок TABLE2 на рис. 5 реализует нелинейную зависимость индуктивности рассеяния ротора от тока фазы ротора согласно кривой 2 на рис. 2. Параметры фазы ротора и ее ток приведены к статору. Для простоты в знаменателе коэффициента передачи блока-усилителя перед

блоком TABLE2 на рис. 5 можно использовать значение тока $I_{\text{ном}}$ в качестве базисного.

ЭДС $\Delta L_{\sigma\alpha}(i_{\alpha}) \frac{di_{\alpha}}{dt}$ вводится в электрическую цепь фазы статора посредством ИНУН3 (см. рис. 4), а ЭДС $\Delta L_{\sigma\alpha}(i_{\alpha}) \frac{di_{\alpha}}{dt}$ вводится в электрическую цепь фазы ротора посредством ИНУН6 (см. рис. 5). Для остальных фаз уравнения аналогичны (1) и (2).

Для смоделированной кривой тока фазы при учете снижения индуктивностей рассеяния (ввиду насыщения от магнитных потоков рассеяния) имеем СКО=10,14% (таблица, строка 3), что говорит об увеличении различия между полученными в результате компьютерного моделирования и эксперимента кривыми тока. Автор предполагал, наоборот, сближение форм кривых. Проанализируем причину несоответствия ожидания факту несколько позже.

Учет влияния скин-эффекта на индуктивности рассеяния. Как видно из рис. 1, выходное напряжение АИН является несинусоидальным полигармоническим. Ток ввиду коммутаций импульсов напряжения имеет явно выраженные пульсации, форма которых близка к треугольной. Частота этих пульсаций превосходит частоту основной гармоники тока. При повышенных частотах закономерно ожидать проявлений скин-эффекта, в том числе снижающего величину индуктивностей рассеяния [27]. Как правило, учет при математическом моделировании АД скин-эффекта, зависящего от частоты тока, заменяется учетом его зависимости от скольжения s [28, 29].

Однако таким образом можно учесть действие скин-эффекта только в роторе при переходных процессах скорости. У нас же сравнение результатов моделирования происходит для установившегося режима (квазистатического, говоря строго), когда колебания скорости цикличны и незначительны по величине. В математических моделях АД на основе систем ОДУ отсутствует как таковой сигнал, соответствующий частоте тока или напряжения. В то же время в явном виде присутствуют скорости изменения токов — это первые производные токов по времени $\frac{di_1}{dt}$ и $\frac{di_2'}{dt}$. Предлагается использовать их вместо частот f_1 и f_2 для учета влияния скин-эффекта. Отметим, что замена значений частоты [30] на первую производную индукции по времени используется при расчете составляющих потерь в стали при несинусоидальном напряжении [31, 32, 33]. Справедливости ради, можно получить значение f_1 в модели АД из сигнала задания частоты вращения либо анализируя период задаваемого напряжения фазы, но это дает лишь частоту основной гармоники, поэтому не поможет при учете влияния скин-эффекта при полигармонических токах.

В [34] представлена аппроксимация экспериментально полученных зависимостей индуктивностей

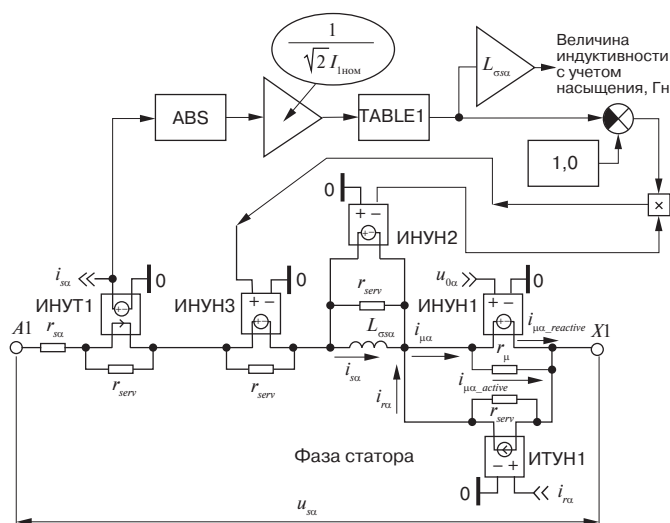


Рис. 4. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния статора) компьютерной модели фазы А обмотки статора АД:
 $I_{\text{ном}}$ — номинальное значение действующего тока фазы статора

Fig. 4. Graphic representation of an adjusted (considering stator leakage flux saturation) computer simulation of Phase A of the stator winding of the asynchronous motor:

$I_{\text{ном}}$ — nominal value of stator phase effective current

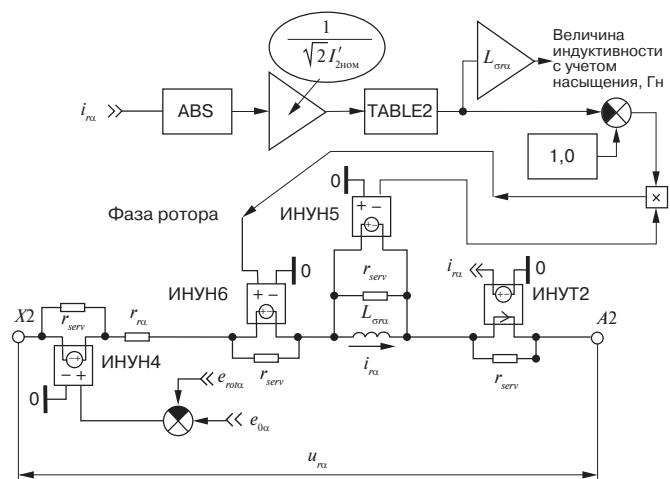


Рис. 5. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния ротора) компьютерной модели фазы А обмотки ротора АД:
 $I'_{2\text{ном}}$ — номинальное значение действующего тока фазы ротора, приведенного к фазе статора

Fig. 5. Graphic representation of an adjusted (considering rotor leakage flux saturation) computer simulation of Phase A of the rotor winding of the asynchronous motor:

$I'_{2\text{ном}}$ — nominal value of the rotor phase effective current reduced to the stator phase

рассеяния от частоты тока в АД номинальной мощностью от 2,2 до 160 кВт выражением $L_{\sigma}(f) = K_L f^{(-0,16)}$, где $K_L = \text{const}$. Например, ввиду влияния скин-эффекта индуктивность рассеяния на частоте 20 кГц будет в 2,6 раза меньше, чем при 50 Гц. Для АД типа

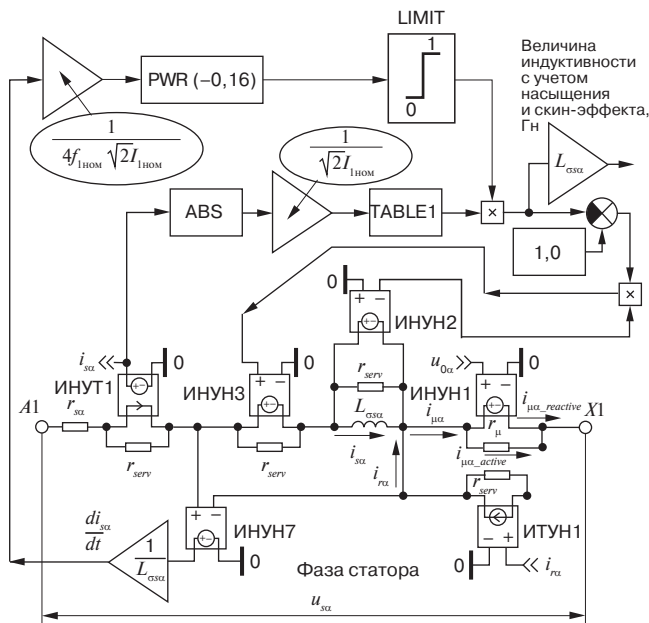


Рис. 6. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния статора и влияния скин-эффекта на индуктивность рассеяния) компьютерной модели фазы А обмотки статора АД:
 $f_{1\text{ном}}$ — номинальная частота тока фазы статора

Fig. 6. Graphic representation of an adjusted (considering the saturation of the stator leakage flux and the skin effect on the leakage inductance) computer simulation of Phase A of the stator winding of the asynchronous motor:
 $f_{1\text{ном}}$ — nominal frequency of stator phase current

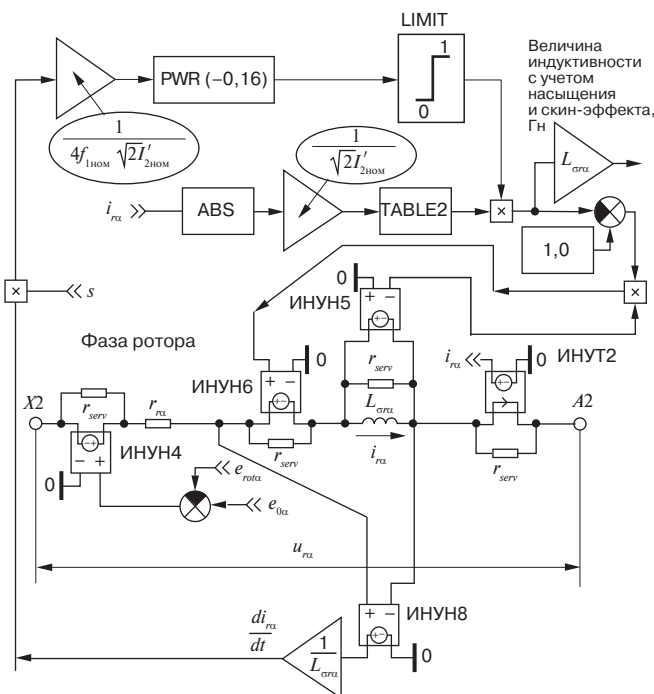


Рис. 7. Графическое изображение уточненной (с учетом насыщения потоком рассеяния ротора и влияния скин-эффекта на индуктивность рассеяния) компьютерной модели фазы А обмотки ротора АД

Fig. 7. Graphic representation of an adjusted (considering the saturation of the rotor leakage flux and the skin effect on the leakage inductance) computer simulation of Phase A of the rotor winding of the asynchronous motor

АЖВ250М2РУХЛ2 все параметры известны для синусоидального тока частотой 50 Гц. Поэтому в качестве базисного значения $\frac{di}{dt}$ можем использовать амплитудное значение тока фазы статора $\sqrt{2} \cdot 197$ А, достигаемое за четверть периода $\frac{1}{4f_{1\text{ном}}} = \frac{1}{4 \cdot 50} = \frac{0,02}{4} = 0,005$ с.

Необходимо учесть особенности физики процессов в роторе: несмотря на то, что в математической модели параметры ротора приведены к статору и в схеме замещения частота тока в роторной цепи такая же, как и в статоре, в реальности частота тока в роторе $f_2 = sf_1$.

Поэтому умножим для фазы ротора $\frac{di'_2}{dt}$ на мгновенное значение скольжения s . Кроме того, ограничим максимальную величину отношения

$$\frac{\frac{di}{dt}}{4\sqrt{2}I_{\text{ном}}f_{1\text{ном}}} = 1.$$

На рис. 6 и 7 показаны дополненные с учетом влияния скин-эффекта компьютерные модели фазы статора и ротора АД. На рисунках блоки LIMIT ограничивают сигнал на выходе между значениями 0 и 1 включительно. Блоки PWR(-0,16) выполняют возведение абсолютной величины входного сигнала в степень -0,16.

Для смоделированной при учете снижения индуктивностей рассеяния ввиду насыщения от магнитных потоков рассеяния и действия скин-эффекта кривой тока имеем СКО = 9,45 % (таблица, строка 6), что не может удовлетворить, поскольку почти не отличается от СКО варианта, приведенного в строке 2 таблицы.

Теперь для рис. 6 и 7 в уравнениях (1) и (2) соответственно для статора и ротора нужно учитывать $\Delta L_\sigma(i, f)$ — разности мгновенных значений индуктивности рассеяния, указанные без учета влияния насыщения и скин-эффекта и с учетом этих влияний.

Компьютерные модели хороши тем, что в них можно отключать влияние тех или иных физических эффектов, что затруднительно, если вообще возможно, в реальных объектах. Отключим влияние насыщения от потоков рассеяния на индуктивность рассеяния ротора. Результат для этого случая дан в строке 7 таблицы: СКО = 8,18 %, что явно лучше. Принимая во внимание результаты в строках 4 и 8 таблицы, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом режиме работы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 не проявляется уменьшение индуктивности рассеяния ротора ввиду насыщения стали магнитными потоками рассеяния. Однако в переходных режимах при возникновении больших токов такое насыщение вполне возможно, поэтому вовсе отключать этот эффект в модели нецелесообразно. Изменим зависимость индуктивности рассеяния ротора от тока таким образом, чтобы

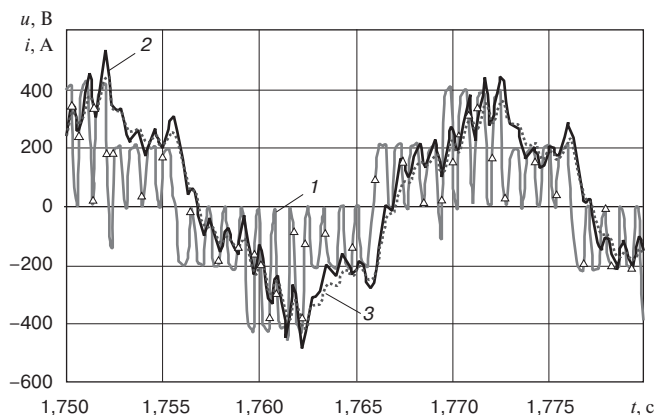


Рис. 8. Иллюстрация характера различия кривых тока фазы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2, полученных экспериментально и в результате компьютерного моделирования, при питании от преобразователя частоты при $f_1 = 48,4$ Гц при условии учета насыщения магнитной цепи не только основным потоком, но и потоками рассеяния статора и ротора, а также учета влияния скин-эффекта на индуктивности рассеяния статора и ротора:
1 — напряжение фазы статора, полученное экспериментально (использовано в качестве входного сигнала при компьютерном моделировании);
2 — ток фазы статора, полученный экспериментально;
3 — ток фазы статора, полученный в результате компьютерного моделирования

Fig. 8. Differences in experimental and computer simulated phase current curves of AZhV250M2RUHL2 type asynchronous motor powered by a frequency converter at $f_1 = 48.4$ Hz, considering the magnetic circuit saturation not only with the main flux, but also with stator and rotor leakage fluxes, as well as considering the skin effect on stator and rotor leakage inductance:
1 — experimental stator phase voltage (used as an input in the computer simulation);
2 — experimental stator phase current;
3 — computer simulated stator phase current

насыщение не оказывало своего влияния до тока $1,2\sqrt{2}I_{\text{ном}}$. Это соответствует использованию кривой 3 вместо кривой 2 (рис. 2). Результаты моделирования такой конфигурации указаны в строке 9 таблицы и на рис. 8 (СКО = 8,04 %). Попытка усилить влияние скин-эффекта на индуктивности рассеяния за счет применения в модели выражения $L_\sigma(f) = K_L f^{(-0,5)}$ не привела к сближению кривых тока, полученных в результате компьютерного моделирования и эксперимента: СКО = 8,13 % (сравнение строк 5 и 4 в таблице при прочих равных условиях).

На рис. 9 показано влияние насыщения потоком рассеяния и скин-эффекта на относительную величину индуктивности рассеяния фазы статора $\dot{L}_{\sigma 1}$. Без учета влияния имеем $\dot{L}_{\sigma 1} = 1$ о.е. При принятой структуре модели АД влияние тех же факторов

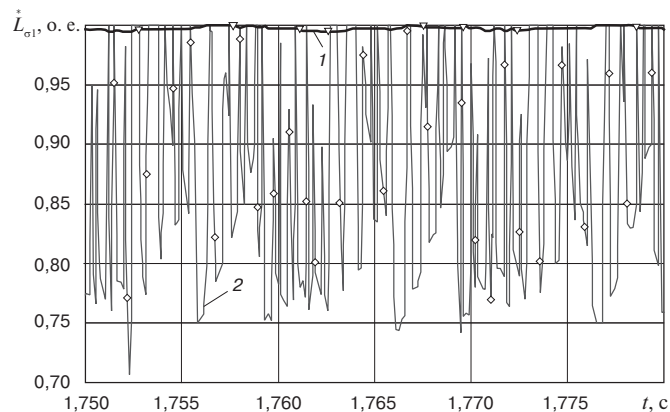


Рис. 9. Влияние на относительную величину $\dot{L}_{\sigma 1}$ насыщения потоком рассеяния статора (1) и скин-эффекта (2) (к результатам моделирования, показанным на рис. 8)

Fig. 9. Influence of stator leakage flux saturation (1) and skin effect (2) on the relative value of $\dot{L}_{\sigma 1}$ (to the simulation results in fig. 8)

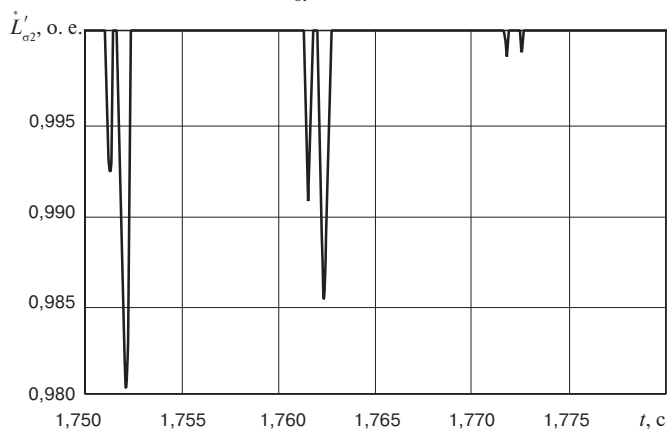


Рис. 10. Влияние на относительную величину $\dot{L}'_{\sigma 2}$ насыщения от магнитного потока рассеяния ротора (к результатам моделирования, показанным на рис. 8)

Fig. 10. Influence on the relative value of $\dot{L}'_{\sigma 2}$ saturation from the rotor magnetic flux leakage (to the simulation results in fig. 8)

на относительную величину индуктивности рассеяния фазы ротора значительно слабее: скин-эффект не проявляется вовсе, а уменьшение индуктивности ввиду насыщения потоком рассеяния ротора незначительно и имеет импульсный характер лишь при отдельных самых высоких пиках тока (см. рис. 10).

Обсуждение. Получен результат — повышение точности расчета мгновенных значений фазных токов АД, питаемого от АИН, что отвечает цели работы. Практическое применение разработанной уточненной компьютерной модели электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН, целесообразно, например, при обосновании выбора полупроводниковых ключей АИН. Тем не менее ток, полученный в результате эксперимента, продолжает демонстрировать по сравнению с расчетным током следующее: быстрее нарастает

и спадает при коммутациях фазного напряжения, имеет несколько большую амплитуду. Преодоление этих особенностей может являться целью дальнейшего совершенствования компьютерной модели электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН.

Заключение. Разработана уточненная компьютерная модель электромагнитных процессов АД, питаемого от АИН, позволившая повысить точность расчета мгновенных значений фазных токов двигателя. Уточнения компьютерной модели позволяют учитывать влияния на характеристики индуктивности рассеяния скин-эффекта и насыщения магнитной цепи потоками рассеяния. Для установившегося режима работы АД типа АЖВ250М2РУХЛ2 наиболее значительное влияние на индуктивность рассеяния обмотки статора оказывает скин-эффект.

Введенные в состав предложенной компьютерной модели уточняющие изменения корректны при определении действующих значений основной гармоники токов фаз, а также средних значений частоты вращения и вращающего момента.

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

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

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 327 с. [Kopylov I. P. *Mathematical simulation of electrical machines*. 3rd ed., revision and additions. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 327 p. (In Russ.)].
2. Тяговые электродвигатели электропоездов / В. И. Бочаров [и др.]; под ред. В. Г. Шербакова. Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. 672 с. [Bocharov V. I., Zaharov V. I., Kolomeytshev L. F., et al. *Electric tractive motors of electric locomotives*. Novocherkassk: Agentstvo Nautilus; 1998. 672 p. (In Russ.)].
3. Хоменко Б. И., Колпахчан Г. И., Пехотский И. В. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС // *Электровозостроение*. 2003. Т. 45. С. 184–191 [Khomenko B. I., Kolpakhch'yan G. I., Pekhotskiy I. V. Auxiliary transistor converters for advanced electric rolling stock. *Elektrovozostroenie*. 2003;45:184–191. (In Russ.)].
4. Патент № 2332777 Российская Федерация, МПК H02M 9/04. Локомотивный преобразователь собственных нужд: № 2007111426/09; заявл. 28.03.2007; опубл. 27.08.2008 / Солтус К. П.,

Синявский И. В., Турулев В. М. 6 с. [Soltus K. P., Sinyavskiy I. V., Turulev V. M. Patent No. 2332777 Russian Federation, МПК H02M 9/04. Locomotive converter of auxiliaries: No: 2007111426/09; appl. 28.03.2007; publ. 27.08.2008. 6 p. (In Russ.)].

5. Тишкин А. А., Курганов А. А. Разработка преобразователя частоты для питания асинхронных электродвигателей вспомогательных машин электропоездов переменного тока // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием в рамках IV Всерос. светотехн. форума с междунар. участием, Саранск, 15–16 марта 2017 г. / отв. ред. О. Е. Железникова. Саранск: Афанасьев В. С., 2017. С. 593–597 [Tishkin A. A., Kurganov A. A. Development of a frequency converter for powering asynchronous electric motors of auxiliary machines of AC electric locomotives. In: Zheleznikova O. E., ed. *Problems and prospects for the development of domestic lighting and electrical engineering and energy: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation in IV All-Russian Lighting Engineering Forum with International Participation, 15–16 March 2017, Saransk*. Saransk: V. S. Afanasev; 2017. p. 593–597 (In Russ.)].

6. Преобразователь для регулируемого вспомогательного электропривода электропоезда переменного тока ЭП200 / И. В. Пехотский [и др.] // *Электровозостроение*. 2002. Т. 44. С. 249–256 [Pekhotskiy I. V., Kolpakhch'yan G. I., Kurochka A. N., Zhukov M. V. Converter for a variable auxiliary electric drive of an AC electric locomotive EP200. *Elektrovozostroenie*. 2002;44:249–256. (In Russ.)].

7. Пустоветов М. Ю. Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электропоезда // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 125–133 [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>.

8. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 264 с. [Sokolovskiy G. G. *Alternating current electric drives with frequency control*. Moscow: Academy; 2006. 264 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/qmjjaex>.

9. Пустоветов М. Ю., Солтус К. П., Синявский И. В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 209 с. [Pustovetov M. Yu., Soltus K. P., Sinyavskiy I. V. *Computer modelling of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters*. Saarbrücken: LAP LAMBERT; 2013. 209 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rmdddp>.

10. Pustovetov M. Induction Electrical Machine Simulation at Three-Phase Stator Reference Frame: Approach and Results. In: *Applied Electromechanical Devices and Machines for Electric Mobility Solutions*. London: IntechOpen; 2020. p. 63–78. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88906>.

11. Моделирование процессов в асинхронном двигателе с регулируемым выходным напряжением инвертора / И. В. Пехотский [и др.] // *Электровозостроение*. 2002. Т. 44. С. 184–193 [Pekhotskiy I. V., Pustovetov M. Yu., Kolpakhch'yan P. G., Pustovetova S. Yu. Simulating processes in an asynchronous motor with a variable output voltage of the inverter. *Elektrovozostroenie*. 2002;44:184–193. In Russ.)].

12. Sher H. A., Addoweesh K. E., Khalid Z., Khan Y. Theoretical and experimental analysis of inverter fed induction motor system under DC link capacitor Failure. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2017;29(2):103–111. <http://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.06.001>.

13. Sudharshana K. R., Ramachandran A., Muralidharan V., Srinivasan R. Simulation and Experimental Validation of Common Mode Voltage in Induction Motor driven by Inverter using Arduino Microcontroller. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering, WCE 2017, 5–7 July 2017, London, U.K.* [S. I.]; 2017. p. 295–300.

14. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю.А. Бахвалов [и др]; под ред. А.А. Зарифьяна. М.: Маршрут, 2006. 374 с. [Bakhvalov Yu.A., Buzalo G.A., Zarifyan A.A., et al. *Dynamic processes in the asynchronous power actuator of mainline electric locomotives*. Moscow: Marshrut; 2006. 374 p. (In Russ.)]
15. Талья И.И., Таргонский И.Л., Лозановский А.Л. Расчет характеристик асинхронного электродвигателя при несинусоидальном напряжении // Электровозостроение. 1994. Т. 34. С. 66–76 [Tal'ya I. I., Targonskiy I. L., Lozanovskiy A. L. Calculation of the characteristics of an asynchronous electric motor at non-sinusoidal voltage. *Elektrovozostroenie*. 1994;34:66–76. (In Russ.)].
16. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя при несинусоидальном напряжении / И.И. Талья [и др.] // Электровозостроение. 1995. Т. 35. С. 106–115 [Tal'ya I. I., Morozova O. I., Lozanovskiy A. L., Targonskiy I. L. Electromagnetic moment of an asynchronous electric motor at non-sinusoidal voltage. *Elektrovozostroenie*. 1995;35:106–115. (In Russ.)].
17. Талья И.И., Пустоветов М.Ю. О пульсации электромагнитного момента асинхронного тягового двигателя в пусковом режиме // Известия вузов. Сер. Электромеханика. 1998. №4. С. 34–37 [Tal'ya I. I., Pustovetov M. Yu. Pulsation of the electromagnetic torque of an asynchronous tractive motor in starting mode. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics*. 1998;(4):34–37. (In Russ.)].
18. Ламмеранер И., Штафль М. Вихревые токи. М.–Л.: Энергия, 1967. 207 с. [Lammeraner J., Shtafel M. *Whirling current*. Moscow, Leningrad: Energia; 1967. 207 p. (In Russ.)].
19. Кеон Дж. Электронное моделирование в OrCAD / Пер. с англ. В.С. Иванова. М.: ДМК Пресс, 2010. 628 с. [Keown J. *OrCAD PSpice and Circuit Analysis*. Moscow: DMK Press; 2010. 628 p. (In Russ.)].
20. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р, 2001. 519 с. [Razevig V. D. *OrCAD design system 9.2*. Moscow: Solon-R; 2001. 519 p. (In Russ.)].
21. Goolak S., Tkachenko V., Št'astniak P., Sapronova S., Liubarskiy B. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive. *Symmetry*. 2022;14(1):150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
22. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2012. 288 с. [Chernykh I. V. *Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow: DMK Press; St. Petersburg: Piter; 2008. 288 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/razcgt>.
23. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин (АВМ): учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1980. 176 с. [Sipaylov G. A., Loos A. V. *Mathematical simulation of electrical machines (ABM): textbook for university students*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1980. 176 p. (In Russ.)].
24. Pustovetov M. An Inductive Coil Simulation. *International Journal of Power Systems*. 2021;6:90–93.
25. Пустоветов М. Модификация компьютерной модели 3-фазного асинхронного двигателя для обеспечения учета магнитного насыщения потоками рассеяния // Международная научно-практическая конференция «Наука. Образование. Культура»: 32-я годовщина Комратского гос. ун-та: сб. ст. Комрат, Молдова: A&V Poligraf, 2023. Т. 1. С. 496–499 [Pustovetov M. Modification of a computer model of a 3-phase asynchronous motor to take into account magnetic saturation by leakage fluxes. In: *International Scientific and Practical Conference "Science. Education. Culture": 32nd Anniv. of the Comrat State University: Coll. of articles. Vol. 1*. Comrat, Moldova: A&V Poligraf; 2023. p. 496–499. (In Russ.)].
26. Zirka S. E., Moroz Yu. I., Arturi C. M. Accounting for the Influence of the Tank Walls in the Zero-Sequence Topological Model of a Three-Phase, Three-Limb Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014;29(5):2172–2179. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2307117>.
27. Wilson P. R., Wilcock R. Frequency Dependent Model of Leakage Inductance for Magnetic Components. *Advanced Electromagnetics*. 2012;1(3):99–106. <https://doi.org/10.7716/aem.v1i3.70>.
28. Maddi Z., Aouzellag D. Dynamic Modelling of Induction Motor Squirrel Cage for Different Shapes of Rotor Deep Bars with Estimation of the Skin Effect. *Progress in Electromagnetics Research*. 2017;59:147–160. <http://doi.org/10.2528/PIERM17060508>.
29. Maksimkina J. The Research of the Processes of the Squirrel-cage Induction Motor's Direct Start-up in the Setting of the Rotor's Variable Parameters. *Power and Electrical Engineering*. 2012;30:53–58.
30. Казаков Ю.Б., Швецов Н.К. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением // Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). 2015. № 5. С. 42–46 [Kazakov Yu. B., Shvetsov N. K. Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage. *Vestnik IGEU*. 2015;(5):42–46. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.5.042-046>.
31. Pfützner H., Shilyashki G., Huber E. Calculated versus measured iron losses and instantaneous magnetization power functions of electrical steel. *Electrical Engineering*. 2022;104:2449–2455. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01474-4>.
32. Rens J., Vandenbossche L., Dorez O. Iron Loss Modelling of Electrical Traction Motors for Improved Prediction of Higher Harmonic Losses. *World Electric Vehicle Journal*. 2020;11(1):24. <https://doi.org/10.3390/wevj11010024>.
33. Torrent M., Andradá P., Blanqué B., Martínez E., Perat J. I., Sanchez J. A. Method for Estimating Core Losses in Switched Reluctance Motors. *European Transactions on Electrical Power*. 2011;21(1):757–771. <https://doi.org/10.1002/etep.475>.
34. Novotny D. W., Nasar S. A., Jeftenic B., Maly D. Frequency Dependence of Time Harmonic Losses in Induction Machines. In: Novotny D. W., Nasar S. A., eds. *High frequency losses in induction motors. Part II: final report*. Cleveland, OH, USA: NASA Lewis Res. Center; 1991. p. 124–129. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910015251/downloads/19910015251.pdf> (accessed: 15.04.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михаил Юрьевич ПУСТОВЕТОВ,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail Yu. PUSTOVETOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Electrical Design Engineer, RIF Shipyard (344019, 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.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, рецензия от первого рецензента получена 16.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 26.06.2023, принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 27.04.2023, first review received 16.05.2023, second review received 26.06.2023, accepted for publication 11.08.2023.

Оригинальная статья

УДК 629.4.015:539.3

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-224-235>EDN: <https://elibrary.ru/lfugjw>

Оценка возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесах и рельсах с использованием критерия Данг Вана

В. И. Сакало, А. В. Сакало ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Под действием динамических нагрузок в материалах колес и рельсов возникают высокие контактные напряжения, приводящие к развитию процессов изнашивания и накопления контактно-усталостных повреждений. Для расчетов на контактную усталость и прогнозирования процессов накопления повреждений предложен ряд подходов. В одном из них используется критерий Данг Вана. Его реализация требует применения трудоемких итерационных процедур, в связи с чем он применяется для оценки контактной усталости в отдельных точках колеса и рельса. С целью упрощения расчетов и получения более обширной информации авторами предложен инженерный метод, позволяющий определять возможность появления контактно-усталостных повреждений для узлов подконтактного слоя, представленного конечно-элементной моделью, при неограниченном количестве реализаций контакта колеса и рельса.

Материалы и методы. Подход базируется на использовании критерия Данг Вана с введением некоторых допущений. В качестве амплитуды касательных напряжений принята амплитуда наибольших касательных напряжений. Компоненты технологических и эксплуатационных остаточных напряжений задаются с использованием результатов экспериментальных исследований или полученных расчетными методами. Информация об условиях в контакте колеса и рельса получена путем моделирования движения экипажа. Расчеты выполнены с учетом изменения профилей колеса и рельса в процессе моделирования, вызванного износом.

Результаты. Получены итоги тестирования для некоторых случаев контакта колеса и рельса, а также определения показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений для колеса и рельса при достаточно большом количестве реализаций контакта. Результаты расчетов представлены в виде изолиний значения показателя для точек слоя, прилегающего к поверхностям катания.

Обсуждение и заключение. Предложенный подход может быть использован для определения возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава и рельсах, в частности при решении задач оптимизации профилей колес и рельсов по критериям износа и контактной усталости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колеса грузовых вагонов, рельсы, компоненты напряжения, наибольшее касательное напряжение, технологические и эксплуатационные остаточные напряжения, критерий Данг Вана, показатель возможности появления контактно-усталостных повреждений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сакало В. И., Сакало А. В. Оценка возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесах и рельсах с использованием критерия Данг Вана // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 224–235. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-224-235>.

✉ sakalo@umlab.ru (А. В. Сакало)

© Сакало В. И., Сакало А. В., 2023

Original article

UDK 629.4.015:539.3

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-224-235>

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



Assessment of the risk of contact fatigue damage in wheels and rails using the Dang Van criterion

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo✉

Bryansk State Engineering University,
Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Dynamic loads cause high contact stresses in the materials of wheels and rails, which leads to their wear and accumulation of contact fatigue damage. A number of approaches were proposed for calculations of contact fatigue and prediction of damage accumulation processes. One of them uses the Dang Van criterion. It involves time-consuming iterative procedures, so it is used to assess contact fatigue at individual points of wheel and rail. In order to simplify calculations and obtain more extensive information, the authors proposed an engineering method that allows determining the risk of contact fatigue damage for sub-contact layer nodes represented by a finite element model, with an unlimited number of wheel—rail contact implementations.

Materials and methods. The approach is based on the use of the Dang Van criterion with the introduction of some assumptions. The amplitude of the largest shear stresses is taken as the amplitude of the shear stresses. The components of technological and operational residual stresses are set using the results of experimental studies or those obtained by calculation methods. Information about wheel—rail contact conditions was obtained by modeling of the vehicle movement. Calculations were performed considering changes in wheel and rail profiles during the modeling process caused by wear.

Results. The test results were obtained for some cases of wheel—rail contact, as well as for determining the contact fatigue damage risk indicator for the wheel and rail with a sufficiently large number of contact implementations. The calculation results are presented in the form of isolines of the value of indicator for the points of the layer adjacent to the tread surfaces.

Discussion and conclusion. The proposed approach can be used to determine the risks of contact fatigue damage in railway wheels and rails, in particular, to optimise wheel and rail profiles according to wear and contact fatigue criteria.

KEYWORDS: railway wheels, rails, stress components, highest shear stress, technological and operational residual stresses, Dang Van criterion, contact fatigue damage risk indicator

FOR CITATION: Sakalo V.I., Sakalo A.V. Assessment of the risk of contact fatigue damage in wheels and rails using the Dang Van criterion. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):224-235. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-224-235>.

✉ sakalo@umlab.ru (A. V. Sakalo)

© Sakalo V. I., Sakalo A. V., 2023

Введение. Безопасность движения на железнодорожных магистралях в значительной мере определяется прочностью и безотказностью деталей и узлов ходовых частей подвижного состава и рельсового пути. Колеса и рельсы испытывают сложный спектр нагрузок, при которых в областях контактов возникают большие напряжения, движение на прямых участках пути сопровождается кривыми и спином [1], а при вписывании в кривые — значительными скоростями продольного и поперечного проскальзывания. В этих условиях активно развиваются процессы их изнашивания и накопления контактно-усталостных повреждений. Накопление повреждений приводит к образованию и развитию трещин в их поверхностных слоях [2]. Например, среди отказов узлов и деталей грузовых вагонов 17 % составляют отказы колесных пар по причине образования усталостных трещин, приводящих к образованию выщербин в поверхностном слое¹. Для устранения поврежденного слоя колесную пару подвергают периодической обточке, а рельсы шлифованию. Обточка выполняется с выкаткой колесных пар, что приводит к значительным материальным затратам. Для обоснования периодичности проведения ремонтных работ разрабатываются методы оценки контактной усталости колес и рельсов и моделирования накопления контактно-усталостных повреждений на основе различных подходов и используемых критериев контактной усталости [3].

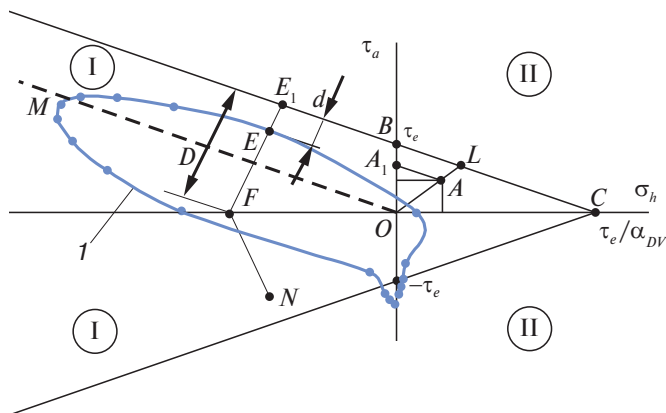


Рис. 1. Диаграмма Данг Вана циклической усталости при многоосном нагружении:

I — путь нагружения; I — нет повреждений; II — есть повреждения

Fig. 1. Dang Van diagram of cyclic fatigue under multiaxial loading:

I — loading path; I — no damage; II — damage present

Для расчетов на контактную усталость при многоосном напряженном состоянии Данг Ваном был предложен критерий, представленный двумя неравенствами [4, 5]:

$$\begin{aligned}\tau_{EQ1} &= [\tau_a(t) + \alpha_{DV} \sigma_h(t)] > \tau_e; \\ \tau_{EQ2} &= [\tau_a(t) - \alpha_{DV} \sigma_h(t)] < -\tau_e,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\tau_a(t)$ — зависимое от времени t значение касательного напряжения на определенной площадке в определенной точке материала, называемое «амплитудой» касательных напряжений; α_{DV} — положительный безразмерный параметр материала, представляющий влияние гидростатического напряжения (коэффициент Данг Вана); $\sigma_h(t)$ — зависимое от времени значение гидростатического напряжения в той же точке; τ_e — касательное напряжение, принимаемое равным пределу усталости материала при чистом сдвиге.

Диаграмма предельных напряжений строится в координатах: σ_h по оси абсцисс, τ_a по оси ординат (рис. 1). Она представляет собой прямую, отсекающую отрезок τ_e / α_{DV} на оси абсцисс и τ_e на оси ординат. Вторая ветвь диаграммы проходит через точку с координатой $-\tau_e$, расположенную на оси ординат. Ветви диаграммы разделяют ее поле на области безопасных и опасных состояний при оценке по критерию Данг Вана. Если напряженное состояние в определенной точке материала представляется точкой, расположенной внутри области, прилегающей к началу координат, оно считается безопасным.

Напряженное состояние в точке в момент времени t представляется на диаграмме отображающей точкой с координатами $\sigma_h(t)$ и $\tau_a(t)$. Набор отображающих точек за цикл называется путем нагружения. При определении значений напряжений $\sigma_h(t)$ и $\tau_a(t)$ задача решается в упругой постановке с использованием допущения о том, что материалы работают в условиях упругой приспособляемости.

Для определения «амплитуды» касательных напряжений используется шестимерное пространство. Напряжения в точках пути нагружения представляются девиаторными составляющими. В шестимерном пространстве поверхность текучести представляет собой гиперсферу. В связи с принятым допущением о работе материала в условиях упругой приспособляемости задача сводится к определению гиперсферы минимального радиуса, вмещающей в себя путь нагружения. Центроид гиперсферы представляет тензор остаточных напряжений, при которых выполняется условие работы материала в условиях упругой приспособляемости.

¹ Протокол заседания Комитета НП «ОПЖТ» по грузовому подвижному составу [Электронный ресурс]: утв. президентом НП «ОПЖТ» 04.04.2022 г. № 1/22 КГПС. URL: https://opzt.ru/wp-content/uploads/2020/09/protokol-ot-11.03.2022-1_22-kgps.pdf (дата обращения: 15.04.2023).

За «амплитуду» касательных напряжений в точке принимается разность между тензором напряжений в точке пути нагружения и тензором остаточных напряжений.

С целью упрощения процедуры определения «амплитуды» касательных напряжений предложено в качестве нее принимать амплитудное значение максимальных касательных напряжений [6]:

$$\tau_{\max}^a = \frac{\sigma_{1a}^d(t) - \sigma_{3a}^d(t)}{2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ij,a}^d(t) = \sigma_{ij}^d(t) - \sigma_{ij,\text{mid}}^d(t)$; $\sigma_{ij,\text{mid}}^d$ — средняя величина девиатора главных напряжений.

Гидростатическое напряжение в точке пути нагружения равно среднему нормальному напряжению:

$$\sigma_h(t) = (\sigma_x(t) + \sigma_y(t) + \sigma_z(t)) / 3. \quad (3)$$

Для определения коэффициента Данг Вана используется зависимость [7, 8]:

$$\alpha_{DV} = 3 \left(\frac{\tau_e}{\sigma_e} - 0,5 \right), \quad (4)$$

где σ_e — предел усталости материала при одноосном напряженном состоянии (растяжении, изгибе); τ_e — предел усталости материала при двухосном напряженном состоянии (кручении, чистом сдвиге).

В таблице приведены значения некоторых параметров для колесной [7] и рельсовой стали [9].

Выбор показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений. При положительном гидростатическом напряжении возможно определение коэффициента запаса сопротивления контактной усталости. Пусть критерий Данг Вана представляется на диаграмме отображающей точкой A (рис. 1). Будем считать подобными состояния, для которых отношения τ_a / σ_h одинаковы. Они представляются точками, лежащими на луче OA . Точка L , расположенная на линии BC , представляет предельное состояние, при котором нет риска появления контактно-усталостных разрушений. Точкой B , лежащей на оси ординат, представляется эквивалентное ему состояние. Аналогично для состояния, представляемого точкой A , эквивалентное ему представлено точкой A_1 и коэффициент запаса равен $\tau_e / (\tau_a^A + \alpha_{DV} \sigma_h^A)$.

Такой подход можно было бы применить и для случаев, когда гидростатическое напряжение отрицательное. Однако если отображающая точка попадает на линию OM , коэффициент запаса становится бесконечно большим, т. е., несмотря на действие переменных касательных напряжений, усталостные процессы не развиваются. Если же точка располагается ниже линии OM , значение критерия Данг Вана становится отрицательным.

Таблица

Характеристики прочности, пределы усталости и коэффициенты Данг Вана для колесной и рельсовой стали

Table

Strength, fatigue limits and Dang Van coefficients for wheel and rail steel

Материал	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Предел усталости σ_e , МПа	Предел усталости τ_e , МПа	α_{DV}
Рельсовая сталь [9]	800	1032	460	270	0,26
Колесная сталь [7]	626,7	1027,7	422,5	265	0,38

Выберем в качестве показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений для точки E расстояние d до линии предельных состояний (рис. 1).

Нормальное уравнение линии BC

$$\mu(\alpha_{DV} \sigma_h + \tau_a - \tau_e) = 0, \quad (5)$$

где μ — нормирующий множитель.

Подставив в левую часть уравнения (5) координаты отображающей точки E , получим ее расстояние до линии предельных состояний:

$$d = \mu(\alpha_{DV} \sigma_h^E + \tau_a^E - \tau_e). \quad (6)$$

Проведем через точку E линию, перпендикулярную линии BC , и точку ее пересечения с ней обозначим E_1 , а с осью абсцисс — F . В качестве коэффициента запаса сопротивления контактной усталости можно принять отношение

$$D / (D - d),$$

где D — длина отрезка FE_1 .

При графическом представлении такого коэффициента возникают трудности, так как он может быть сколь угодно большим. Примем в качестве показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений n_{RCF} величину, обратную коэффициенту запаса:

$$n_{RCF} = \frac{D - d}{D}. \quad (7)$$

Точка F имеет координаты $(\sigma_h^E - \alpha_{DV} \tau_a^E; 0)$. Подставив их в нормальное уравнение линии BC (8), получим длину D отрезка FE_1 :

$$D = \mu[\alpha_{DV}(\sigma_h^E - \alpha_{DV} \tau_a^E) - \tau_e]. \quad (8)$$

Тогда показатель возможности появления контактно-усталостных повреждений равен

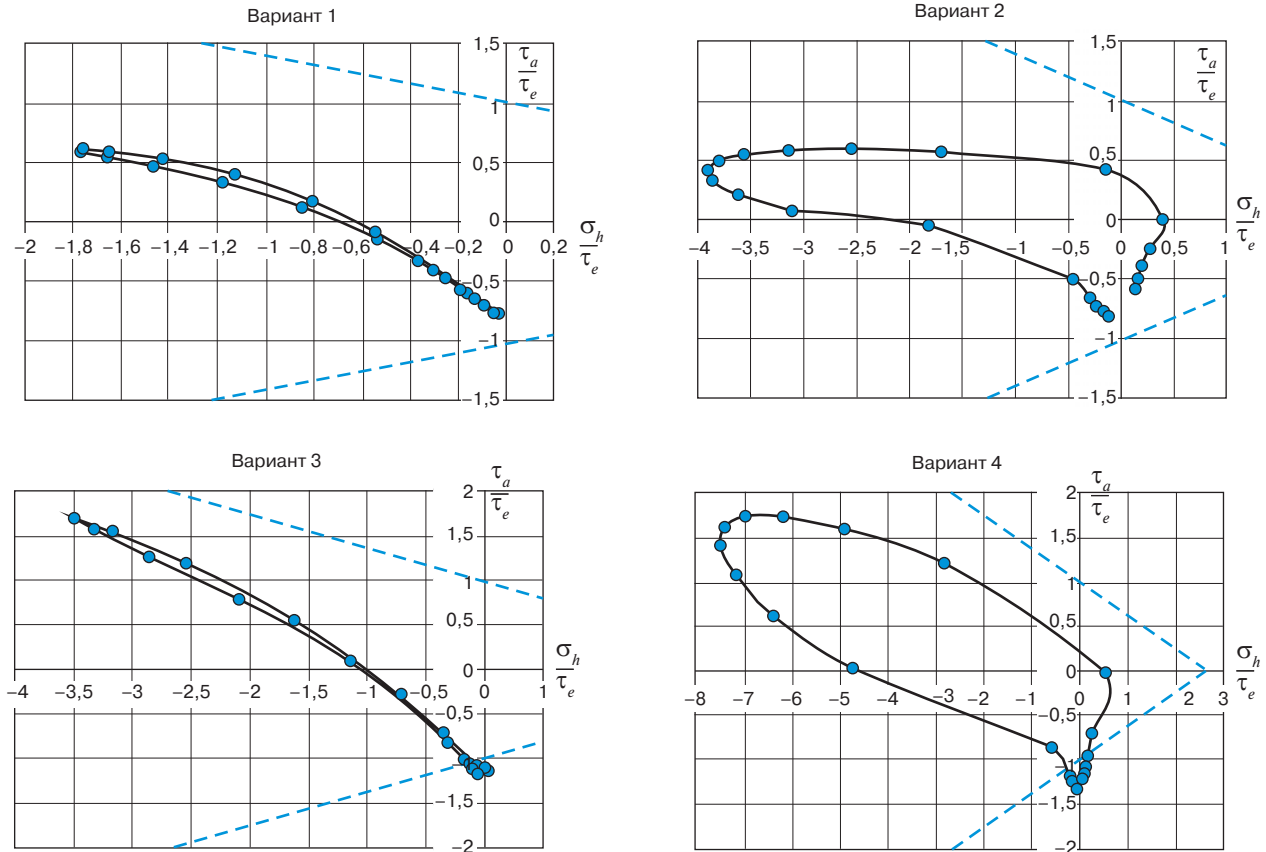


Рис. 2. Пути нагружения точек колеса, полученные без учета остаточных напряжений

Fig. 2. Wheel point loading paths regardless of residual stresses

$$n_{RCF} = -\frac{(1 + \alpha_{DV}^2) \tau_a^E}{\alpha_{DV} (\bar{\sigma}_h^E - \sigma_{DV} \bar{\tau}_a^E) - \tau_e}. \quad (9)$$

Перейдя к относительным величинам $\bar{\sigma}_h^E = \sigma_h^E / \tau_e$, $\bar{\tau}_a^E = \tau_a^E / \tau_e$, получим

$$n_{RCF} = -\frac{(1 + \alpha_{DV}^2) \bar{\tau}_a^E}{\alpha_{DV} (\bar{\sigma}_h^E - \alpha_{DV} \bar{\tau}_a^E) - 1}. \quad (10)$$

Если отображающая точка располагается на линии предельных состояний, показатель n_{RCF} равен единице, а если приближается к оси абсцисс, он стремится к нулю. При n_{RCF} , превышающем 1, есть риск появления контактно-усталостных повреждений.

Тестирование. В вариантах 1 и 2 рассмотрены случаи, когда точка начального контакта расположена на оси симметрии рельса. Радиус колеса принят равным 475 мм, радиус головки рельса 500 мм. Нагрузка от колеса на рельс принята равной 125 кН, а с учетом коэффициента динамичности — 162,5 кН. Предполагается полное скольжение колеса относительно рельса вдоль оси рельса. Расчеты проведены без учета остаточных

напряжений. Для колесной стали пределы усталости приняты равными $\sigma_e = 422,5$ МПа, $\tau_e = 265$ МПа, коэффициент Данг Вана $\alpha_{DV} = 0,38$ (таблица).

При нагрузке 162,5 кН длина полуоси a эллипса в зоне контакта упругих тел составила 7,79 мм, полуоси b — 8,39 мм, максимальное давление на поверхности контакта $p_0 = 1186$ МПа.

На рис. 2 представлены пути нагружения: в варианте 1 для точки, расположенной на оси z , на расстоянии 3,94 мм от поверхности при коэффициенте трения $f = 0,17$; в варианте 2 для точки, расположенной на оси z , на расстоянии 0,1 мм от поверхности при коэффициенте трения $f = 0,3$. Диаграммы построены в относительных координатах — координаты точек пути нагружения отнесены к пределу усталости при чистом сдвиге τ_e . Линии диаграммы Данг Вана показаны пунктирными прямыми.

Получены наибольшие значения показателя n_{RCF} : 0,77 у сбегающего края контакта для варианта 1; 0,79 у набегающего края контакта для варианта 2.

Если контакт расположен на участке поверхности рельса, описанном радиусом 80 мм, при нагрузке

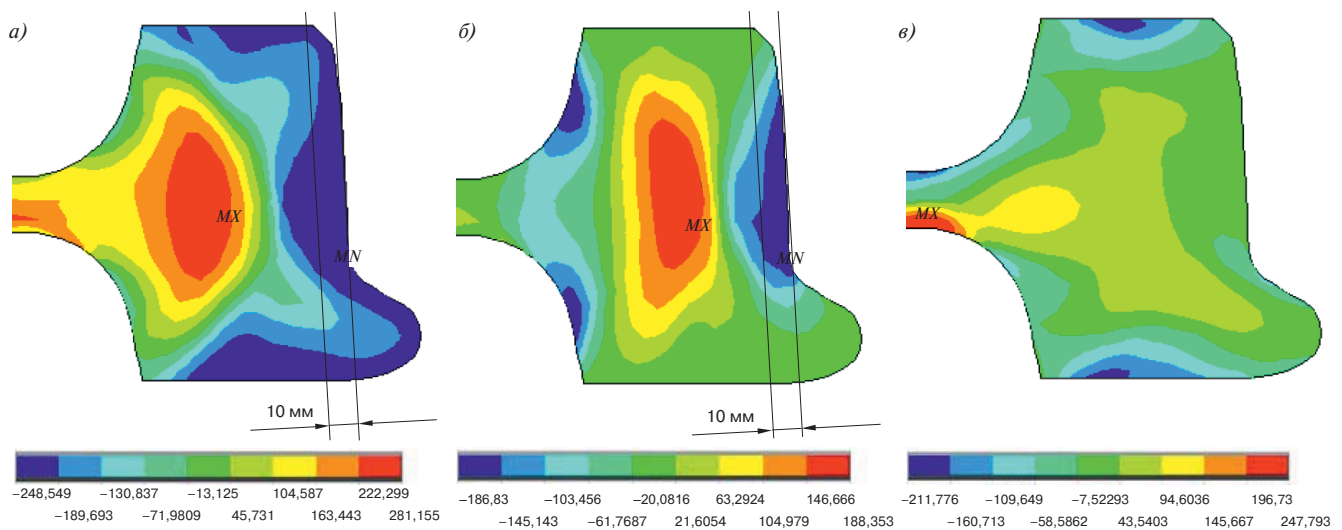


Рис. 3. Изолинии остаточных технологических напряжений в обод вагонного колеса с плоскоконическим диском [10]:
а — окружных; б — осевых; в — радиальных

Fig. 3. Residual technological stress isolines in a railway wheel rim with a flat-conical disk [10]:
а — circumferential; б — axial; в — radial

162,5 кН длина полуоси a эллипса в зоне контакта, ориентированной по направлению качения, равна 10,35 мм; полуоси b , ориентированной в поперечном направлении, составляет 3,2 мм; отношение полуосей $\beta = 0,309$; эксцентриситет e равен 0,95. Максимальное давление p_0 на поверхности контакта равно 2343 МПа. Расстояние от точки, в которой $\tau_{\max}$ имеет наибольшее значение при нормальной нагрузке, расположенной на оси z под поверхностью контакта, равно 2,3 мм. В вариантах 3 и 4 рассмотрено скольжение колеса по направлению большой оси эллипса контакта. В первом случае получен путь нагружения для точки, расположенной на оси z на глубине 2,3 мм при коэффициенте трения 0,17; во втором случае — для точки, расположенной на оси z на глубине 0,1 мм при коэффициенте трения, равном 0,3. Они представлены на рис. 2.

Если пятно контакта вытянуто по направлению скольжения, в варианте 3 значения показателя n_{RCF} у набегающего и сбегающего краев контакта примерно одинаковы и равны 1,12. В варианте 4 они равны соответственно 1,24 и 1,21.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. При высоком максимальном давлении в контакте, достигающем 2343 МПа, в рассмотренных вариантах показатель n_{RCF} превышает единицу, что говорит о возможности появления контактно-усталостных повреждений.

Технологические и эксплуатационные остаточные напряжения. В [10] с использованием программного комплекса ANSYS получены распределения технологических напряжений в колесе вагона с плоскоконическим диском, выполненном из стали марки 2 по ГОСТ 10791–2011 «Колеса цельнокатанные.

Технические условия» с учетом термической обработки. Они вводятся в расчет суммарных напряжений. На рис. 3 показаны распределения окружных, осевых и радиальных напряжений в обод колеса. В подконтактном слое толщиной 10 мм, где наибольшая вероятность образования контактно-усталостных трещин, окружные напряжения практически по всей толщине слоя постоянные, сжимающие и равны –248 МПа. Напряжения, параллельные осевой линии колеса, на участке значительной протяженности могут считаться постоянными. Они сжимающие и равны –186 МПа. Радиальные напряжения малы, ими можно пренебречь.

В [11] приведены результаты экспериментального определения остаточных технологических напряжений в рельсе. Исследования проводились на рельсе, обозначаемом в промышленном стандарте Японии как JISE 1101. Масса погонного метра рельса составляет 60 кг.

Использовался отрезок рельса, прошедшего термическую обработку и правку, не бывавшего в эксплуатации и имеющего длину 0,5 м. На середине отрезка рельса были установлены тензорезисторы для измерения деформаций в параллельном и поперечном направлениях оси рельса. Для определения технологических остаточных напряжений был выполнен срез рельса с установленными тензорезисторами толщиной 20 мм. Снимались показания тензорезисторов до получения среза рельса и после. По разности показаний установлены значения продольных и поперечных остаточных напряжений. По показаниям тензорезистора, установленного на поверхности катания по оси симметрии рельса, определены продольные и поперечные деформации, равные $\varepsilon_z = 0,75 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_x = -0,25 \cdot 10^{-3}$.

Для остаточных напряжений получаем

$$\sigma_{zR} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_x) = 149 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{xR} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_z) = -5,5 \text{ МПа}.$$

Остаточные напряжения учитываются путем прибавки их к компонентам напряжений, возникающих в точке от сил, распределенных на поверхности контакта.

При производстве рельса в процессе охлаждения даже при равномерном отводе тепла меняется скорость охлаждения по периметру поперечного сечения. Это вызывает продольное остаточное напряжение, типичная величина которого 100...200 МПа: в головке рельса — растяжение, а в шейке подобной величины — сжатие².

Остаточные напряжения меняются во времени в процессе эксплуатации после укладки в путь. Основной причиной изменения является то, что результирующее напряжение, возникающее при воздействии усилий и остаточных деформаций в некоторых точках поперечного сечения рельса, может достичь предела текучести. Изменение очень значительное на поверхности катания рельса под ударным воздействием колеса и на кромках подошвы, особенно на наружной стороне.

В бышем в эксплуатации рельсе продольное остаточное напряжение σ_{zR} в точке, расположенной на поверхности контакта, равно -85 МПа, а в точке, лежащей на оси y на расстоянии 10 мм от поверхности катания, оно положительное и равно 105 МПа. Для продольных остаточных напряжений σ_{zR} можно принять линейный закон изменения в зависимости от расстояния от поверхности контакта:

$$\sigma_{zR} = 19y - 85, \text{ МПа.} \quad (11)$$

В слое толщиной 10 мм, прилегающем к поверхности катания рельса, не бывшего в эксплуатации, остаточные напряжения можно аппроксимировать двумя зависимостями:

$$\sigma_{zR} = 49,15y + 72,4, \text{ МПа, при } 0 < y \leq 4 \text{ мм}; \quad (12)$$

$$\sigma_{zR} = -17,25y + 338, \text{ МПа, при } 4 < y \leq 10 \text{ мм.} \quad (13)$$

В [12] исследованы технологические остаточные продольные деформации с использованием 30 тензорезисторов. На поверхности катания рельса они меняются от $0,544 \cdot 10^{-3}$ до $0,912 \cdot 10^{-3}$. Поперечные деформации малы, поэтому продольные остаточные

напряжения в основном определяются этими деформациями. Это позволяет дать им ориентировочную оценку

$$\sigma_{zR} = (108,8...182,4) \text{ МПа}.$$

В точке, расположенной на оси симметрии рельса, это напряжение составляет 175 МПа.

Влияние технологических остаточных напряжений.

Получены пути нагружения для некоторых точек колеса с учетом технологических остаточных напряжений. Для вариантов 5 и 6 использованы те же условия, что и для вариантов 2 и 4 соответственно, с учетом остаточных технологических напряжений $\sigma_{xR} = -248$ МПа, $\sigma_{yR} = -187$ МПа.

Получены пути нагружения для тех же точек, что и в соответствующих вариантах, расположенных на оси z на глубине 0,1 мм. Они представлены на рис. 4. Для варианта 5 линии предельных состояний не показаны, они проходят вне поля графика. Как видно из рисунков, при учете технологических остаточных напряжений для этих вариантов получены пути нагружения, отображающие точки которых не выходят за пределы областей безопасных состояний. Получены наибольшие значения показателя n_{RCF} у сбегающих краев контактов: 0,49 для варианта 5 и 0,89 для варианта 6.

Исследована возможность появления контактно-усталостных повреждений в не бывшем в эксплуатации рельсе с учетом остаточных технологических напряжений. В варианте 7 (рис. 4) получено решение для точки, расположенной на оси z на расстоянии 0,1 мм от поверхности контакта, где напряжения σ_{zR} — растягивающие, равные 149 МПа, напряжения σ_{xR} — сжимающие, равные -2 МПа. Заданы условия, подобные принятым в варианте 3: нормальная сила в контакте 162,5 кН, длина полуоси a — 10,35 мм, полуоси b — 3,2 мм, максимальное давление $p_0 = 2343$ МПа, $\tau_e = 270$ МПа, коэффициент Данг Вана $\alpha_{DV} = 0,26$ при коэффициенте трения $f = 0,3$. Получены показатели контактно-усталостного повреждения, величиной более единицы: 1,13 у сбегающего края и 1,27 у набегающего.

В варианте 8 исследована возможность появления контактно-усталостных повреждений в не бывшем в эксплуатации рельсе с учетом остаточных технологических напряжений $\sigma_{zR} = 269$ МПа и $\sigma_{xR} = 0$ в точке, расположенной на оси z на расстоянии 4 мм от поверхности контакта. Заданы условия, подобные принятым в варианте 2: нормальная сила в контакте 162,5 кН, длина полуоси a — 7,79 мм, полуоси b — 8,39 мм, максимальное давление $p_0 = 1186$ МПа, коэффициент Данг Вана $\alpha_{DV} = 0,26$ при коэффициенте

² Р 709. Рекомендации по неразрушающим методам определения напряженного состояния рельсов бесстыкового пути [Электронный ресурс]: утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 5–7 ноября 2019 г. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/1528895> (дата обращения: 15.04.2023).

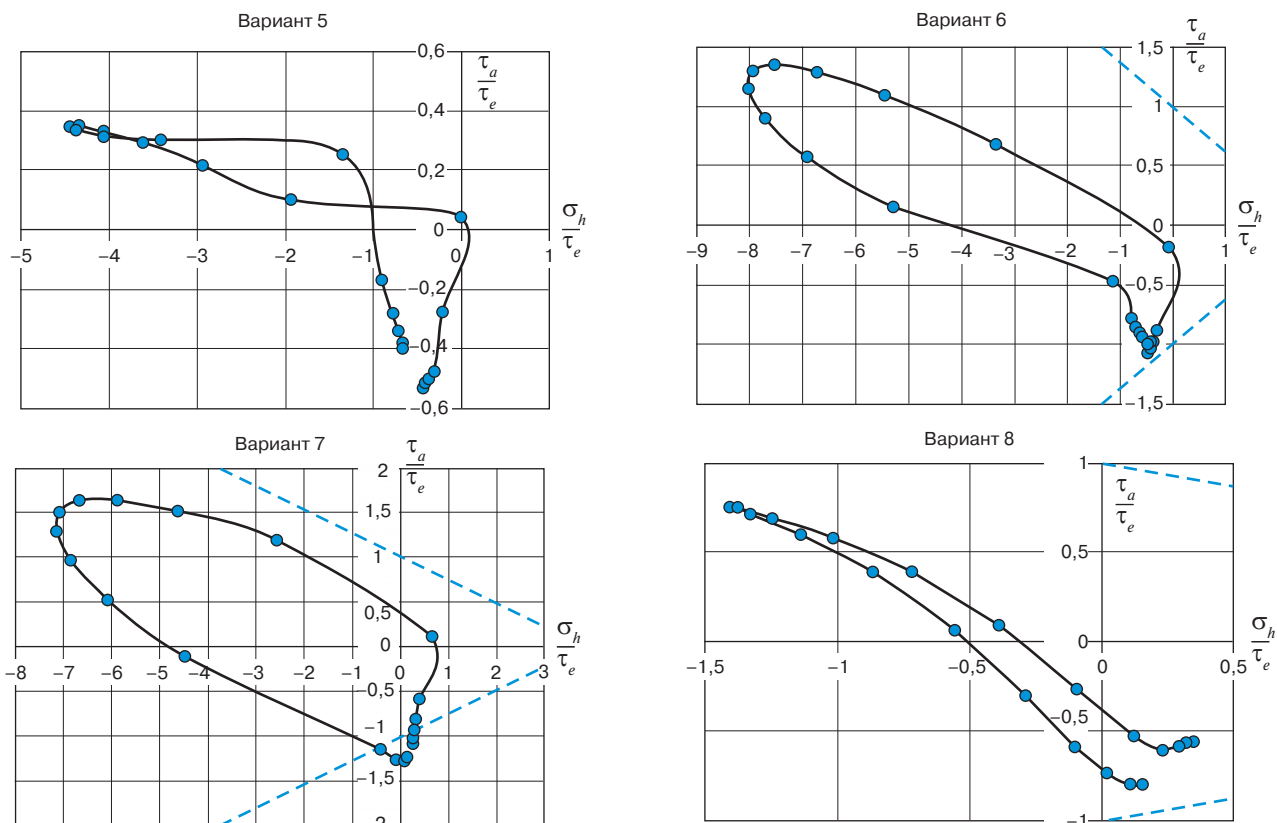


Рис. 4. Пути нагружения с учетом остаточных напряжений: варианты 5 и 6 для точек колеса, варианты 7 и 8 для точек рельса

Fig. 4. Loading paths given residual stress: variants 5 and 6 for wheel points, variants 7 and 8 for rail points

трения $f = 0,3$. Полученные показатели контактно-усталостного повреждения меньше единицы, наибольшего значения 0,83 они достигают у сбегающего края контакта (рис. 4).

Пример расчета показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений. Для выполнения тестовых расчетов использовались исходные данные, полученные в результате моделирования динамики движения колеса по рельсу в программном комплексе «Универсальный механизм». Подходы к моделированию динамики описаны в работе [13].

Исходные данные включают: координаты профилей колеса и рельса, блоки нагружения в виде распределения сил для множества реализаций контакта колеса с рельсом, остаточные напряжения, предел усталости τ_e материала колеса или рельса при чистом сдвиге (кручении), коэффициент Данг Вана.

Предел усталости τ_e для колесной стали принят равным 265 МПа, для рельсовой стали 270 МПа. Коэффициент Данг Вана задан равным 0,38 для колесной стали и 0,26 для рельсовой.

Создание трехмерной конечно-элементной схемы начинается с построения плоской сетки из четырехугольных конечных элементов. Она создается на базе узлов, расположенных на профиле колеса, с шагом

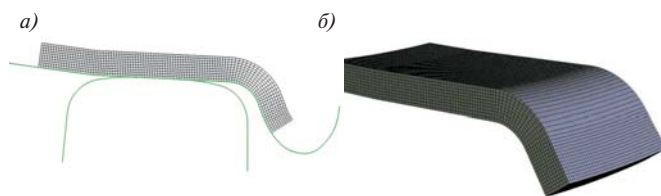


Рис. 5. Конечно-элементные сетки фрагмента колеса: а — плоская; б — трехмерная

Fig. 5. Wheel fragment finite element meshes: а — plain; б — three-dimensional

1 мм (рис. 5, а). Размер сетки охватывает участок профиля, на котором происходит контактирование при любых возможных положениях колеса на рельсе. Затем создается трехмерная сетка с поворотом относительно оси колесной пары, при этом плоская сетка «протягивается» по дуге окружности (рис. 5, б).

Моделируется движение экипажа по пути с заданным профилем в плане. При расчете показателя n_{RCF} для выбранного колеса намечается его радиальное сечение. Для каждого случая попадания этого сечения в контакт с рельсом решается контактная задача, получается распределение нормальных и касательных узловых сил по поверхности контактного пятна.

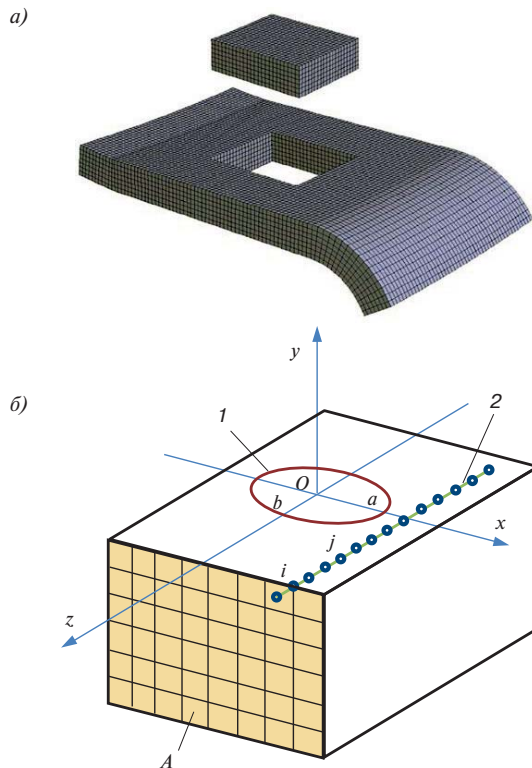


Рис. 6. Фрагмент конечно-элементной сетки:
 а — выделение фрагмента из конечно-элементной сетки колеса;
 б — сетка фрагмента колеса, прилегающего к пятну контакта;
 1 — пятно контакта; 2 — путь точки

Fig. 6. Finite element mesh fragment:
 а — separation of a fragment from the finite element mesh of a wheel;
 б — mesh of the wheel fragment adjacent to the contact patch;
 1 — contact patch; 2 — point path

Из конечно-элементной сетки выделяется фрагмент с пятном контакта, размеры которого зависят от формы и размеров контактного пятна (рис. 6, а). При определении напряжений в узлах выделенного фрагмента от узловых сил, распределенных по поверхности контакта, используется модель фрагмента на упругом основании [1]. На рис. 6, б условно показан выделенный конечно-элементный фрагмент. Он состоит из восьмиузловых конечных элементов. После определения значений компонентов напряжений (суммированием величин остаточных напряжений и напряжений от контактных сил в узлах фрагмента) для узлов плоской сетки A определяют циклы напряжений, меняющихся при перекатывании колеса вдоль оси z . Более удобно считать контакт неподвижным, а узел i перемещающимся вдоль оси z . От зависимостей напряжений от времени можно перейти к зависимостям от координат узла. Тогда путь нагружения составят напряжения, полученные для узла i при каждом его положении j .

При расстоянии между позициями j точки, равном размеру конечного элемента по оси z , это будут напряжения в узлах конечно-элементной модели.

Для этого плоская сетка A , показанная на рис. 6, б, «протягивается» вдоль оси z под поверхностным слоем. На первой прогонке для каждой позиции j узла i , совпадающей с положением узла конечно-элементной модели, с использованием девиатора D суммарных напряжений

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ — среднее напряжение, вычисляются главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и максимальное касательное напряжение

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (15)$$

На второй прогонке вычисляется среднее напряжение $\tau_{\max}^{\text{mid}}$

$$\tau_{\max}^{\text{mid}} = \sum_{i=0}^k \tau_{\max i} / k, \quad (16)$$

где k — количество узлов выделенного фрагмента по оси z .

Для каждого положения j узла i вычисляются компоненты критерия Данг Вана: «амплитуда» касательного напряжения и гидростатическое напряжение

$$\begin{aligned} \tau_a(t) &= \tau_{\max i} - \tau_{\max}^{\text{mid}}; \\ \sigma_h(t) &= \sigma_0. \end{aligned} \quad (17)$$

Этими компонентами состояние для каждой позиции представляется отображающей точкой на диаграмме Данг Вана. Совокупность таких точек составляет цикл или путь нагружения.

Показатель возможности появления контактно-усталостных повреждений n_{RCF} определяется для каждой точки пути нагружения с использованием зависимости (9). Из них выбирается наибольший. Если он больше полученного на предыдущих реализациях контакта, он приписывается узлу i .

Результаты расчета отображаются в виде изолиний значений показателя n_{RCF} и в цветовой заливке. В областях, где он больше единицы, возможно образование контактно-усталостных трещин.

Моделирование износа материалов колеса или рельса в программном комплексе «Универсальный механизм» выполняется параллельно с моделированием движения экипажа³. Это итерационная процедура, которая выполняется отдельно либо для колеса, либо для

³ Руководство пользователя Универсальный механизм 9. Прогнозирование износа профилей колес и рельсов [Электронный ресурс]. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/16_um_predicting_railway_profile_wear.pdf (дата обращения: 15.04.2023).

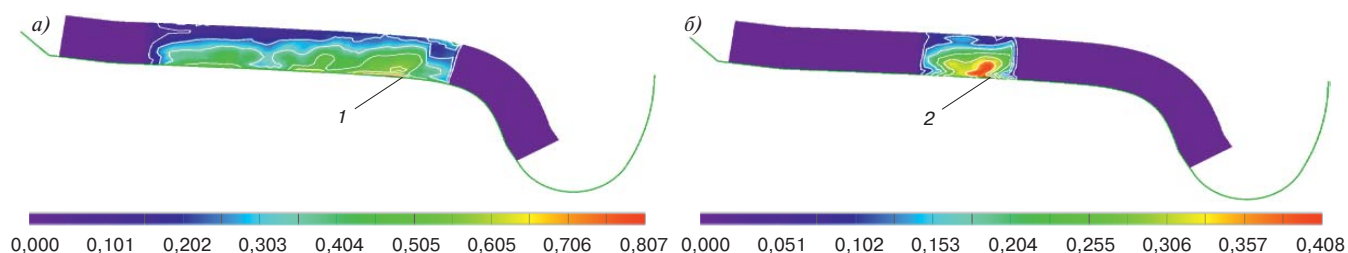


Рис. 7. Пример визуализации результатов моделирования в радиальном сечении колеса грузового вагона:
 а — изолинии максимальных значений показателя n_{RCF} после 762 реализаций контакта колеса с рельсом; б — изолинии значений показателя n_{RCF} для одной реализации контакта колеса с рельсом: 1, 2 — точки с максимальным значением показателя n_{RCF}

Fig. 7. A visualisation of simulation results in the radial section of a railway wheel:

а — isolines of the maximum n_{RCF} after 762 implementations of a wheel — rail contact; б — n_{RCF} isolines for one implementation of a wheel — rail contact: 1, 2 — points with maximum n_{RCF}

рельса. При моделировании износа колеса в прямых и кривых участках пути задаются профили рельсов, которые не меняются в процессе моделирования. Итерации износа колеса назначаются по пробегу. Профиль колеса меняется после каждой итерации износа. При моделировании износа рельса задаются профили колес, которые не меняются в процессе моделирования. Итерации износа рельса назначаются по пропущенному тоннажу. Профиль рельса меняется после каждой итерации износа. В связи с этим изолинии значений показателя n_{RCF} выдаются для каждого варианта геометрии профилей колеса или рельса.

В модели грузового вагона использовалось колесо, соответствующее ГОСТ 10791–2011, с прокатом 0,9 мм и боковым износом 1,2 мм, в модели рельсового пути — рельс Р65 по ГОСТ Р 51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», в неизношенном состоянии в прямом участке пути и с вертикальным износом 2 мм и боковым износом 6,8 мм в кривой.

При исследовании возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесе моделировался проезд грузового вагона в груженом состоянии массой 90 т в прямом участке пути и в кривой радиусом 600 м. Контактно-усталостные повреждения в гребне не моделировались. Компоненты технологических остаточных напряжений в ободе колеса (окружных, осевых и радиальных) для узлов конечно-элементной сетки были приняты равными полученным в работе [10].

На рис. 7, а приведены изолинии максимальных значений показателя n_{RCF} в узлах конечно-элементной сетки после 762 реализаций контакта колеса с рельсом. Наибольшее значение показателя возможности появления контактно-усталостных повреждений $n_{RCF} = 0,807$ получено для точки 1, расположенной на поверхности катания, сдвинутой от круга катания в сторону гребня.

На рис. 7, б показаны изолинии значений показателя n_{RCF} для одной из реализаций контакта, при которой

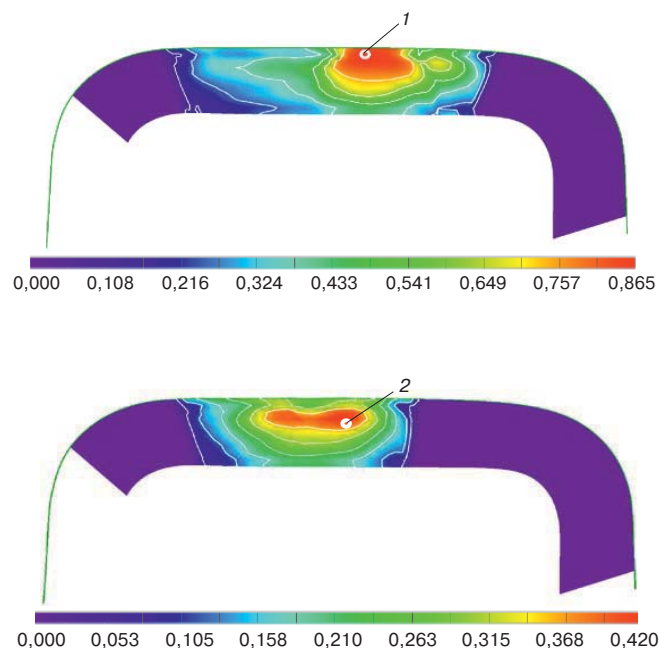


Рис. 8. Пример визуализации результатов моделирования в поперечном сечении рельса:
 а — изолинии максимальных значений показателя n_{RCF} после 1200 реализаций контакта колеса с рельсом; б — изолинии значений показателя n_{RCF} для одной реализации контакта колеса с рельсом: 1, 2 — точки с максимальным значением показателя n_{RCF}

Fig. 8. A visualisation of simulation results in a rail cross section:
 а — isolines of the maximum n_{RCF} after 1200 implementations of a wheel — rail contact; б — n_{RCF} isolines for one implementation of a wheel — rail contact: 1, 2 — points with maximum n_{RCF}

нормальная сила в контакте была равна 107 кН, а максимальное давление 1484 МПа. Наибольшее значение показателя $n_{RCF} = 0,408$ получено для точки 2, расположенной на поверхности катания.

При исследовании возможности появления контактно-усталостных повреждений в рельсе использовался рельс Р65 с вертикальным износом 0,8 мм. Для колеса использовались два типа профилей:

колесо с профилем по ГОСТ 10791–2011 в неизношенном состоянии и с прокатом 0,9 мм и боковым износом 1,2 мм. Моделировалось движение по рельсу в прямом участке пути грузового вагона в грузе массой 90 т. Остаточные технологические напряжения σ_z в рельсе задавались равными 85 МПа.

Получены результаты моделирования после 1200 случаев реализаций контакта колеса с рельсом. Изолинии максимальных значений показателя n_{RCF} в узлах конечно-элементной сетки после 1200 реализаций контакта колеса с рельсом представлены на рис. 8, а. Наибольшее значение показателя, равное 0,865, получено для точки 1, расположенной на глубине 1 мм под поверхностью катания. На рис. 8, б приведены изолинии значений показателя n_{RCF} для одной из реализаций контакта колеса с рельсом, при которой нормальная сила в контакте составила 117 кН, а максимальное давление — 895 МПа. Точка 2 с наибольшим значением показателя, равным 0,420, располагается на глубине 2 мм.

Обсуждение и заключение. В процессе эксплуатации материалы колесных пар подвижного состава железных дорог и рельсов подвергаются износу и контактной усталости. Особенность процесса накопления контактно-усталостных повреждений состоит в том, что в точках подконтактного слоя напряженное состояние является трехосным.

В подходах к расчетам используется допущение о том, что материалы работают в условиях упругой приспособляемости, достигнутой благодаря упрочнению материала за счет появления системы остаточных напряжений на ранней стадии упругопластического деформирования. В одном из них используется критерий Данг Вана. К достоинствам этого подхода нужно отнести получение тензора остаточных напряжений расчетным путем. Однако для решения таких задач применяются трудоемкие итерационные процедуры. В связи с этим расчеты выполняются лишь для некоторых выбранных точек. Для определения коэффициента Данг Вана используются пределы усталости материала при одноосном напряженном состоянии и чистом сдвиге, которые получают экспериментальным путем, и, если они неизвестны, такие испытания необходимо провести. Результаты расчетов представляются в виде путей нагружения, нанесенных на диаграмму контактной усталости, и имеют качественный характер. Если точки пути нагружения не выходят за область безопасных состояний, считается, что накопления повреждений не происходит.

Для инженерных приложений необходима количественная оценка, которой мог бы быть коэффициент запаса или другая величина, характеризующая близость точки пути нагружения к области опасных состояний.

В предложенном авторами подходе в качестве такой оценки выбрана величина, показывающая, насколько отображающая точка близка к линии предельных состояний — показатель возможности появления контактно-усталостных повреждений n_{RCF} . При попадании точки нагружения на линию диаграммы контактной усталости он равен 1, а при приближении ее к оси абсцисс уменьшается до нуля. Для точек, попадающих в область опасных состояний, он больше 1. В качестве амплитуды касательных напряжений выбрана амплитуда τ_{max} . Для ввода в расчеты технологических и эксплуатационных остаточных напряжений используются результаты экспериментальных исследований либо полученные расчетными методами. Принятые упрощения позволили определять значения показателя n_{RCF} не для одной точки, а для узлов конечно-элементной сетки подконтактного слоя толщиной 10 мм при любом количестве реализаций контакта.

Удобство анализа результатов моделирования обеспечивается выдачей значений показателя n_{RCF} для узлов плоской конечно-элементной решетки подконтактного слоя в виде изолиний и в цветовой заливке. Параллельно с моделированием движения единицы подвижного состава выполняется моделирование износа материалов колес или рельсов, поэтому изолинии выдаются для каждого варианта геометрии изношенных поверхностей.

Ограничением является необходимость задания для расчетов распределений технологических или эксплуатационных остаточных напряжений в материалах колес и рельсов.

Предложенный подход может быть использован для определения возможности появления контактно-усталостных повреждений в колесах железнодорожного подвижного состава и рельсах, например при решении задач оптимизации профилей колес и рельсов по критериям износа и контактной усталости.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Сакало В. И., Сакало А. В., Коссов В. С. Механика контактного взаимодействия колеса и рельса. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2021. 376 с. [Sakalo V. I., Sakalo A. V., Kossov V. S. *Mechanics of contact interaction of wheel and rail*. Moscow, Berlin: Direct-Media; 2021. 376 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/jychir>.

2. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / под ред. С.М. Захарова. М.: Интекст, 2004. 160 с. [Zakharov S.M., ed. *Contact-Fatigue Damage of Freight Car Wheels*. Moscow: Intex; 2004. 160 p. (In Russ.)].

3. Захаров С.М., Торская Е.В. Подходы к моделированию возникновения поверхностных контактно-усталостных повреждений в рельсах // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 5. С. 259–268 [Zakharov S.M., Torskaya E.V. Approaches to modeling occurrence of rolling contact fatigue damages in rails. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(5):259-268. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-259-268>.

4. Dang Van K., Griveau B., Message O. On a New Multiaxial Fatigue Limit Criterion: Theory and Application. In: Brown M.W., Miller K.J., ed. *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF 3*. UK, London: Mechanical Engineering Publications; 1989. p. 479–496.

5. Dang Van K., Cailletaud G., Fiavenot J.F., Le Douaron A. and Lieurade H.P. Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading. In: Brown M.W., Miller K.J., ed. *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF 3*. UK, London: Mechanical Engineering Publications; 1989. p. 459–478.

6. Ekberg A. *Rolling contact fatigue of railway wheels*. PhD Thesis. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology; 2000. p. 1–27.

7. Kim T.-Y., Kim H.-K. Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis for wheel–rail rolling contact fatigue. *International Journal of Engineering and Technology*. 2014;6(3):1593-1600.

8. Ciavarella M., Monno F., Demelio G. On the Dang Van fatigue limit in rolling contact fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2006;28(8):852-863. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.11.002>.

9. Dang Van K., Maitournam M.H. On some recent trends in modeling of contact fatigue and wear in rail. *Wear*. 2002;253(1-2):219-227. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00104-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00104-7).

10. Керенцев Д.Е. Повышение конструкционной прочности железнодорожных колес подвижного состава: дис.... канд. техн. наук: 01.02.06. Самара, 2016. 173 с. [Kerentsev D.E. *Improving the structural strength of railway wheels of rolling stock*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 01.02.06. Samara; 2016. 173 p. (In Russ.)].

11. Takahashi S., Sasaki T., Kondoh Y., Hirose Yu. *Residual stress evaluation of railway rails*. [S. I.]: JCPDS – International centre for diffraction data; 2009. p. 240–247.

12. Фимкин А.И., Долотказин Д.Б. Расчетно-экспериментальный метод определения продольных остаточных напряжений в железнодорожных рельсах // Вестник МИИТа: научно-технический журнал. 2001. № 6. С. 28–39 [Fimkin A.I., Dolotkazin D.B. Experimental determination of the longitudinal residual stresses in railway rails. *Vestnik moskovskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta*. 2001;(6):28-39. (In Russ.)].

13. Kovalev R., Lysikov N., Mikheev G. Pogorelov D., Simonov V., Yazykov V., et al. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. *Multibody System Dynamics*. 2009;22(4):399-423. <https://doi.org/10.1007/s11044-009-9170-6>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович САКАЛО,

д-р техн. наук, профессор, кафедра подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Алексей Владимирович САКАЛО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра подъемно-транспортных машин и оборудования, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Lifting and Transport Machines and Equipment, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, Blvd. 50-let Oktyabrya), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Alexey V. SAKALO,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Lifting and Transport Machines and Equipment, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, Blvd. 50-let Oktyabrya), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, разработка подхода для определения возможности появления контактно-усталостных повреждений, выполнение тестовых расчетов аналитическими методами, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

Алексей Владимирович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, разработка и программная реализация математических моделей, выполнение тестовых расчетов численными методами, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, development of an approach to determine the risk of contact fatigue damage, test calculations performed by analytical methods, evaluation of results, editing and preparation of the text of the article (50 %).

Alexey V. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, development and software implementation of mathematical models, test calculations performed by numerical methods, evaluation of results, editing and preparation of the text of the article (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 18.04.2023, рецензия от первого рецензента получена 11.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 29.05.2023, принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 18.04.2023, first review received 11.05.2023, second review received 29.05.2023, accepted for publication 19.07.2023.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.31:621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>EDN: <https://elibrary.ru/hgfzuw>

Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений

Е. А. Третьяков, О. В. Балагин, С. А. Живушко✉

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
Омск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В период года с преобладанием отрицательных значений температуры окружающего воздуха существует высокая вероятность пробоя изоляции тяговых электродвигателей электровозов, при этом неизбежно снижение эксплуатационной надежности электровоза в целом. Примерно в 70 % случаев пробоя изоляции происходят из-за увлажнения обмоток и коллектора. Цель работы — исследование возможности повышения эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции коллекторных тяговых электродвигателей постоянного тока на основе электрокинетических явлений (электроосмоса) с отработкой фактических параметров процесса электроосмотической сушки.

Материалы и методы. Получены опытные данные на основе проведения испытаний на реальных тяговых электродвигателях в сервисном локомотивном депо. Для реализации технологии электроосмотической сушки применялось устройство для увлажнения обмоток и коллектора электродвигателя, разработанное авторами, а также штатные приборы для измерения сопротивления изоляции тяговых электродвигателей.

Результаты. Выполненные исследования показали, что электроосмотическую сушку целесообразно проводить при напряжении 3000 В; сушка эффективна при обдуве от электрокалориферных установок, совместное использование электроосмотической и электрокалориферной сушки за первые два-три часа повышает сопротивление изоляции на 20–40 %; электроосмотическая сушка показывает наибольшую скорость нарастания сопротивления изоляции при подключении ее к обмоткам с сопротивлением ниже 500 кОм; расход электроэнергии при использовании электроосмотической сушки совместно с электрокалориферной снижается на 60 %, а затраты времени — на 20 %.

Обсуждение и заключение. Технология сушки найдет применение в условиях сервисного локомотивного депо в цехах при проведении ТР-1 и при эксплуатации тягового электроподвижного состава в условиях низких значений температуры окружающего воздуха. Возможно применение сушки при горячем отстое электровозов, эффективность этого способа потребует опытного подтверждения. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции позволит снизить количество отказов тяговых электродвигателей за счет использования электрокинетических явлений, обеспечивая повышение надежности электровозов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрический подвижной состав, тяговый электродвигатель, изоляция, электрокинетические явления, электроосмотическая сушка, надежность электровозов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Третьяков Е. Ф., Балагин О. В., Живушко С. В. Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 236–245. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>.

✉ sergei.zhivushko@outlook.com (С. В. Живушко)

© Третьяков Е. Ф., Балагин О. В., Живушко С. В., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.31:621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>

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



Improving the operational reliability of electric locomotives by reducing the moisture content of electric traction motor insulation based on electrokinetic phenomena

Evgeny A. Tretyakov, Oleg V. Balagin, Sergei V. Zhivushko✉

Omsk State Transport University,
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Seasons with dominant negative ambient temperatures increase the possibility of insulation failure of electric locomotive traction motors with the service reliability of electric locomotive inevitably plummeting as a whole. Wet commutator and windings result from approximately 70% of insulation failures. The paper examines ways of improving the service reliability of electric locomotives by reducing the moisture content in the insulation of DC commutator traction motors based on electrokinetic phenomena (electroosmosis) with testing the actual parameters of the electroosmotic drying.

Materials and methods. We obtained experimental data from tests on real electric traction motors in a locomotive service depot. The electroosmotic drying technology involved a device for moistening the electric motor commutator and windings developed by the authors, and standard tools for measuring the insulation resistance of electric traction motors.

Results. The research shows that electroosmotic drying is feasible at a voltage of 3000 V; drying is effective with electric heater blowing; electroosmotic and electric heat drying system together increase insulation resistance by 20–40% in the first two to three hours; electroosmotic drying shows the highest rate of increase in insulation resistance when connected to windings with a resistance below 500 kΩ; electroosmotic and electric heat drying system together use 60% less electricity and 20% less time.

Discussion and conclusion. The drying technology is useful in locomotive service depots, in workshops during TR-1 maintenance and when operating traction electric rolling stock in low ambient temperatures. The drying technology is applicable in hot storage of electric locomotives; the effectiveness of this method requires experimental confirmation. This technology for increasing the resistance of wet insulation would reduce electric traction motor failures using electrokinetic phenomena, increasing reliability of electric locomotives.

KEYWORDS: electric rolling stock, electric traction motor, insulation, electrokinetic phenomena, electroosmotic drying, reliability of electric locomotives

FOR CITATION: Tretyakov E. A., Balagin O. V., Zhivushko S. V. Improving the operational reliability of electric locomotives by reducing the moisture content of electric traction motor insulation based on electrokinetic phenomena. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):236-245. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-236-245>.

Введение. В периоды года с низкими значениями температуры окружающего воздуха у электровозов существует высокая вероятность пробоя изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД) из-за образования инея на обмотках и коллекторе. Как следствие этого неизбежно снижение эксплуатационной надежности электровоза в целом. На рис. 1 изображены графики отказов ТЭД электровозов серии 2ЭС6 локомотивного депо Западно-Сибирской железной дороги в период с января 2022 по апрель 2023 г. Как видно, наибольшее количество повреждений происходит с октября-ноября по март, в период преобладания отрицательных температур окружающего воздуха. Примерно в 70 % случаев эти повреждения происходят из-за увлажнения обмоток и коллектора.

Для предотвращения пробоев во время горячего простоя производят поддержание требуемого уровня сопротивления изоляции ТЭД обдувом мотор-вентиляторами, вращающимися на низких частотах¹. Однако этот процесс также не исключает снижения сопротивления изоляции ТЭД электровозов ниже допустимых значений, поэтому производителем электровозов серии 2ЭС6 была реализована токовая сушка ТЭД под токоприемником с управлением через микропроцессорную систему управления и диагностирования [1]. Указанная сушка осуществляется током величиной 300 А для нагрева меди обмоток и элементов ТЭД. Недостатком токовой сушки является ускоренный процесс старения изоляции,

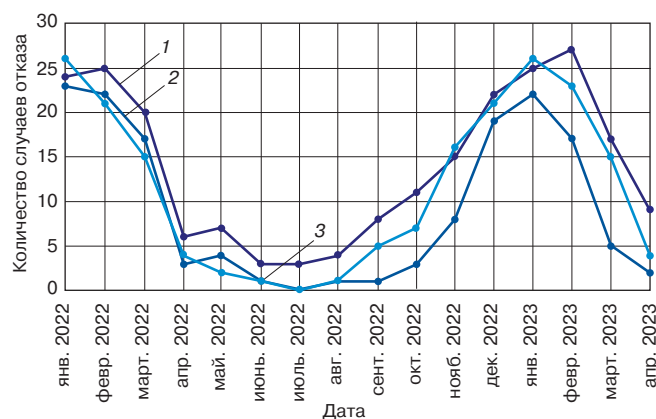


Рис. 1. Отказы ТЭД электровозов за период с 2022 по 2023 г. (повреждения узлов):

1 — якорь; 2 — дополнительные полюса и компенсационные обмотки; 3 — обмотки возбуждения

Fig. 1. Electric locomotive electric traction motor (ETM) failures in 2022–2023 (assemblies damage):

1 — anchor; 2 — additional poles and compensation windings; 3 — excitation windings

растрескивание, коробление, повышенный расход электрической энергии, а также необходимость небольшого передвижения по железнодорожному пути, поскольку ТЭД включены встречно, и их моменты не уравновешивают друг друга. В условиях сервисного локомотивного депо в зимний период применяется электрокалориферная сушка, которая требует значительного расхода электроэнергии [2].

Известна технология выведения влаги из внутренних слоев изоляции за счет применения электрокинетических явлений — электроосмоса [3]. В научных работах [4–10] описывается подобный метод и устройства, которые позволяют без нагрева обмоток высушивать изоляцию промышленных асинхронных электродвигателей переменного тока 380 В средней мощности (до 22 кВт), силовых трансформаторов до 35 кВ и осуществлять их влагозащиту.

Для коллекторных ТЭД постоянного тока электровозов устройства электроосмотической сушки (ЭОС) не разрабатывались и не испытывались. Для ЭОС коллекторных ТЭД постоянного тока требуется обоснование параметров напряжения и технологии сушки увлажненной изоляции на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы — исследовать возможности повышения эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции ТЭД на основе электрокинетических явлений с отработкой фактических параметров процесса электроосмотической сушки. Для этого авторами решались следующие задачи: экспериментально исследованы изменения свойств увлажненной изоляции ТЭД под воздействием ЭОС с разными параметрами прикладываемого напряжения; исследована эффективность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровозов совместно с электрокалориферной сушкой при текущем ремонте в сервисном локомотивном депо в объеме ТР-1; определена область практического применения ЭОС в период отрицательных температур окружающего воздуха.

Материалы и методы. Как известно, электрокинетические явления — это перенос дисперсной фазы или дисперсной среды коллоидной системы относительно друг друга, происходящий под внешним электрическим полем [11–13]. Они связаны с тангенциальным движением жидкости вблизи заряженной поверхности и являются проявлениями электрических свойств поверхностей раздела в стационарных и изотермических условиях. Явление электроосмоса характеризуется «электрокинетическим потенциалом», или « ζ -потенциалом», т. е. разностью потенциалов на границах фаз между твердыми телами и жидкостями,

¹ Инструкция по прогреву электровозов при отстое на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.03.2013 № ЦТ-36р. 10 с. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1691997886&tid=ru&lang=ru&name=23e979feb44e2> (дата обращения: 16.04.2023).

что служит мерой электрического заряда частиц. Определяется ζ -потенциал уравнением Гельмгольца — Смолуховского [14]:

$$\zeta = \frac{4\pi\eta\chi\vartheta}{\varepsilon I}, \quad (1)$$

где η — вязкость среды, Па·с; χ — удельная электропроводность жидкости, См/м; ϑ — кинематическая вязкость жидкости, Па·с; ε — диэлектрическая проницаемость; I — сила тока, А.

Электроосмотическая скорость представляет собой равномерную скорость жидкости вдали от заряженной границы раздела. Постоянная линейная скорость жидкости также описывается выражением Гельмгольца — Смолуховского [15]:

$$u_{Es} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} E, \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; E — напряженность внешнего электрического поля, В/м.

Как видно из выражения (2), скорость жидкости внутренних слоев изоляции зависит от напряженности электрического поля. Поэтому ЭОС целесообразно осуществлять при высоком напряжении, допустимом для изоляции ТЭД.

На первом этапе экспериментальных исследований изменения свойств увлажненной изоляции под воздействием ЭОС по утвержденной программе выполнялись испытания на отдельных ТЭД типа ЭДП-810, СТК-810, ЭК-810 и ДПТ-810. Для реализации задач исследования авторами был собран источник тока с возможностью изменения формы и амплитуды выходного напряжения (рис. 2).

Положительный потенциал источника пульсирующего напряжения подключается к обмоткам якоря, главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотке; отрицательный — к корпусу ТЭД (рис. 2).

Увлажнение отдельных ТЭД осуществлялось с помощью отпаривателя-парогенератора типа Grand Master, как показано на рис. 3. В процессе увлажнения все технологические отверстия закрывались с помощью брезента для быстрого увлажнения обмоток и коллектора электродвигателя. Насадка парогенератора помещалась в вентиляционный люк (рис. 4), а поток нагнетаемого пара был направлен так, чтобы пар проходил между якорем и остовом и через отверстия в сердечнике якоря. Процесс увлажнения контролировался посредством измерения сопротивления изоляции обмоток ТЭД штатным прибором каждые 5 мин. Процесс увлажнения ТЭД, как правило, сопровождался снижением сопротивления изоляции со значений 300 МОм — 1,7 ГОм до 50 КОм — 1,5 МОм.

Процесс ЭОС увлажненной изоляции ТЭД без внешнего обдува осуществлялся при пульсирующем

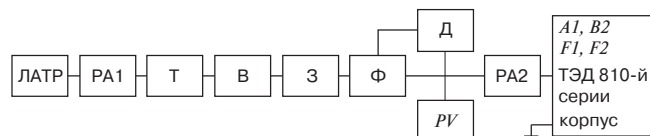


Рис. 2. Структурная схема источника ЭОС:
ЛАТР — линейный автотрансформатор; РА1, РА2 — амперметры; Т — повышающий трансформатор; В — высоковольтный выпрямитель; З — защитный предохранитель; Ф — фильтр-конденсатор; Д — делитель напряжения; PV — вольтметр

Fig. 2. Structural diagram of an electroosmotic drying source:
ЛАТР — linear autotransformer; РА1, РА2 — ammeters; Т — step-up transformer; В — high-voltage rectifier; З — protector; Ф — condenser filter; Д — voltage divider; PV — voltmeter



Рис. 3. ТЭД типа ДПТ-810 № 2032 в процессе его увлажнения:
1 — отпариватель-парогенератор типа Grand Master

Fig. 3. DPT-810 No. 2032 type ETM humidification process:
1 — Grand Master type steamer

напряжении 500, 1000, 1500, 3000 В, где переменная составляющая не превышала 10 %, вырабатывалась источником переменного напряжения с частотой 100 Гц и регулировалась применением различных величин емкости в фильтре.

Испытания проводились на двенадцати ТЭД. На рис. 5 представлены результаты увеличения сопротивления изоляции обмоток остова ТЭД типа ЭДП-810 № 2032 при пульсирующем напряжении 1000 В (частота переменной составляющей 100 Гц, амплитуда 230 В).

На рис. 6–8 представлены графики изменения сопротивления увлажненной изоляции ТЭД при различных напряжениях.

С увеличением величины подаваемого напряжения эффективность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД возрастает.

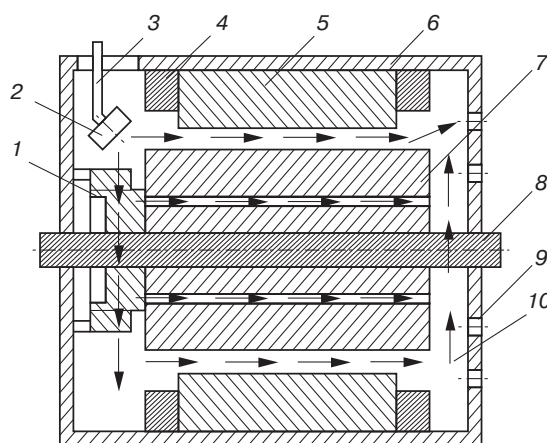


Рис. 4. Схема увлажнения на продольном разрезе двигателя типа ЭДП-810:

1 — коллекторно-щеточный узел; 2 — насадка парогенератора типа Grand Master; 3 — патрубок парогенератора; 4 — обмотка возбуждения; 5 — главный полюс; 6 — остов; 7 — сердечник якоря; 8 — вал; 9 — вентиляционные отверстия; 10 — потоки пара

Fig. 4. Moisturising diagram on a longitudinal section of an EDP-810 type ETM:

1 — commutator and brush assembly; 2 — Grand Master steamer mouth piece; 3 — steamer branch pipe; 4 — excitation winding; 5 — main pole; 6 — frame; 7 — anchor core; 8 — shaft; 9 — vent holes; 10 — steam flows

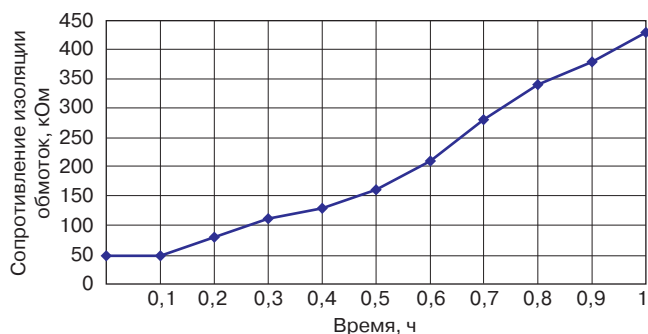


Рис. 5. Показания сопротивления изоляции обмоток остова ТЭД типа ЭДП-810 № 2032 при напряжении 1000 В

Fig. 5. EDP-810 No. 2032 type ETM frame winding insulation resistance indications at a voltage of 1000 V

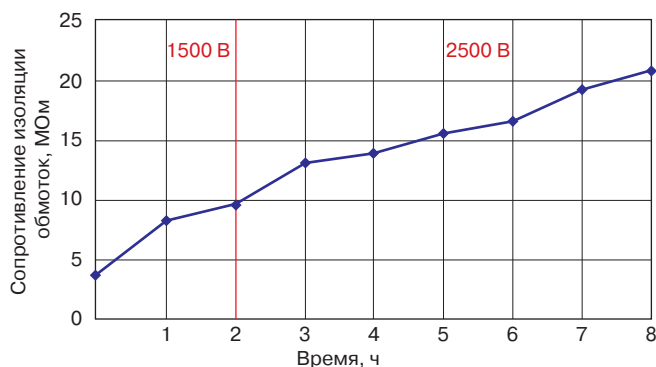


Рис. 6. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ЭК-810 № 4746 при напряжениях 1500 и 2500 В

Fig. 6. Change in EK-810 No. 4746 type ETM insulation resistance at voltages of 1500 and 2500 V

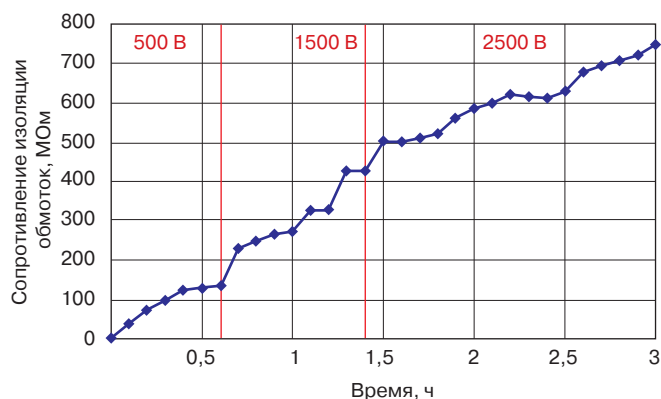


Рис. 7. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа СТК-810 № 2356 при напряжениях 500, 1500 и 2500 В

Fig. 7. Change in STK-810 No. 2356 type ETM insulation resistance at voltages of 500, 1500 and 2500 V

Для сравнения результатов ЭОС увлажненной изоляции ТЭД типа ЭДП-810 (рис. 5) с сушкой в естественных условиях отапливаемого цеха был повторно увлажнен ТЭД типа ЭК-810 № 4746 до значения 1 МОм. На рис. 9 представлен график изменения сопротивления изоляции ТЭД при естественной сушке в отапливаемом цеху.

В рамках решения задачи исследования эффективности ЭОС была выполнена опытная проверка ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровоза серии 2ЭС6 совместно с сушкой электрокалорифером. Электровоз был перемещен с открытого воздуха с отрицательной температурой в отапливаемый цех сервисного депо для выполнения ТР-1.

Работа электрокалориферной установки осуществлялась согласно следующему циклу: 2 ч обдув холодным воздухом (с выключенным нагревательным элементом), 2 ч обдув горячим воздухом. Как правило, указанная сушка на практике осуществляется за 3–4 цикла. Основная задача электрокалориферной сушки — обеспечение значений сопротивления изоляции ТЭД и электрооборудования в измеряемой силовой цепи электровоза не ниже допустимых (к моменту завершения ТР-1 и выводу электровоза из стойла).

На рис. 10 представлены результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД на электровозе 2ЭС6 № 317 в процессе сушки с помощью электрокалориферной установки.

Как видно из данных рис. 10, электрокалориферная сушка в рассматриваемом случае не обеспечивает сопротивление изоляции ТЭД 1–2 до требуемых значений (более 15 МОм) за 8 ч.

Согласно утвержденной программе эксперимента авторами выполнялась ЭОС изоляции одной группы ТЭД (1–2, 3–4, 5–6, 7–8) совместно с электрокалориферной сушкой. Указанная ЭОС осуществлялась

с помощью разработанного устройства при пульсирующем напряжении 3000 В.

Положительный потенциал выходного напряжения устройства ЭОС подключался к силовой шине ОЗ1, а отрицательный потенциал — к корпусу двигателя электровоза серии 2ЭС6 № 317 (рис. 11).

Результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 642 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой представлены на рис. 12. ЭОС выполнялась с подключением через 1 ч после начала измерений к 3–4 группе ТЭД.

Результаты измерений сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой представлены на рис. 13. ЭОС выполнялась с подключением через 1 ч после начала измерений к 3–4 группе ТЭД.

Результаты. По результатам выполненных исследований ЭОС увлажненной изоляции отдельных ТЭД и группы ТЭД при постановке электровозов серии 2ЭС6 в отапливаемый цех в период отрицательных значений температур окружающего воздуха можно сделать следующие выводы:

1. Напряжение, при котором необходимо выполнять ЭОС изоляции ТЭД 810-й серии, составляет 3000 В. В случае сопротивления изоляции обмоток ТЭД ниже 500 кОм требуется снижать прикладываемое напряжение ЭОС для ограничения тока утечки на заданном уровне.

2. Повышение интенсивности процессов ЭОС увлажненной изоляции ТЭД было отмечено только при обдуве изоляции воздухом от электрокалориферных установок.

3. При использовании ЭОС увлажненной изоляции ТЭД одновременно с электрокалориферной сушкой происходит наибольшее увеличение скорости восстановления сопротивления изоляции ТЭД в первые два-три часа после подключения устройства ЭОС, при этом сопротивление изоляции повышается на 20–40 %. В конце процесса сушки через 10–12 ч сопротивления всех групп ТЭД практически равны.

4. ЭОС наиболее эффективна при сопротивлении изоляции обмоток ТЭД ниже 500 кОм. При значениях сопротивления изоляции 15 МОм и выше ЭОС оказывает меньшее влияние, чем в области малых сопротивлений изоляции ТЭД.

5. Использование ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой позволяет снизить расход электрической энергии до 60 % путем уменьшения подачи горячего воздуха в цикле работы электрокалориферной установки, а также за счет снижения времени сушки на 20 %. Расход электроэнергии на ЭОС составляет до 100 Вт на электровоз.

6. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции позволит снизить количество отказов ТЭД за декабрь — март

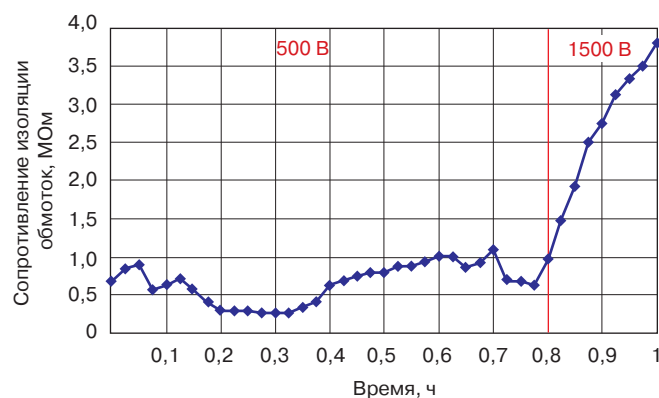


Рис. 8. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ДПТ-810 № 5433 при напряжениях 500 и 1500 В

Fig. 8. Change in DPT-810 No. 5433 type ETM insulation resistance at voltages of 500 and 1500 V

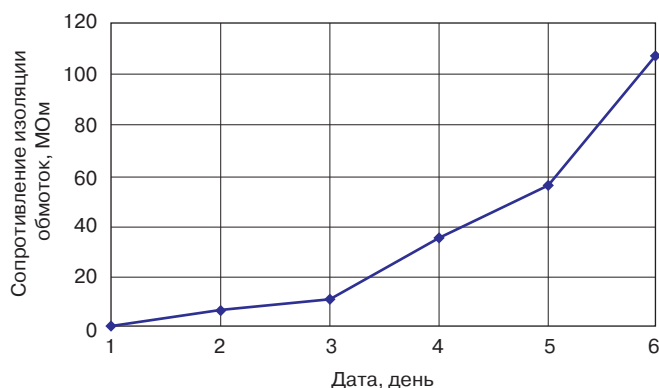


Рис. 9. Изменение сопротивления изоляции ТЭД типа ЭК-810 № 4746 при сушке естественным образом

Fig. 9. Change in EK-810 No. 4746 type ETM insulation resistance in natural drying

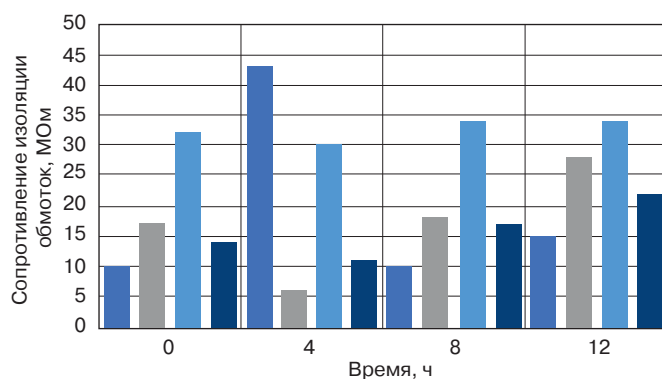


Рис. 10. Сопротивление обмоток изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 317 в процессе сушки с помощью электрокалориферной установки:

■ группа ТЭД 1–2 ■ группа ТЭД 3–4 ■ группа ТЭД 5–6 ■ группа ТЭД 7–8

Fig. 10. Electric locomotive 2ES6 No. 317 ETM insulation windings resistances while drying with an electric heat system:

■ Group ETM 1–2 ■ Group ETM 3–4 ■ Group ETM 5–6 ■ Group ETM 7–8

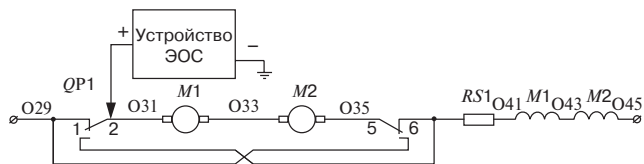


Рис. 11. Схема подключения устройства ЭОС к силовой схеме электровоза серии 2ЭС6 № 317:
QP1 — реверсор; M1, M2 — ТЭД; RS1 — шунт; O29, O31, O33, O35, O41, O43, O45 — номера проводников в схеме

Fig. 11. Connection diagram of the electroosmotic dryer to the power circuit of a 2ES6 No. 317 electric locomotive:
QP1 — reverser; M1, M2 — ETM; RS1 — shunt; O29, O31, O33, O35, O41, O43, O45 — numbers of conductors in the diagram

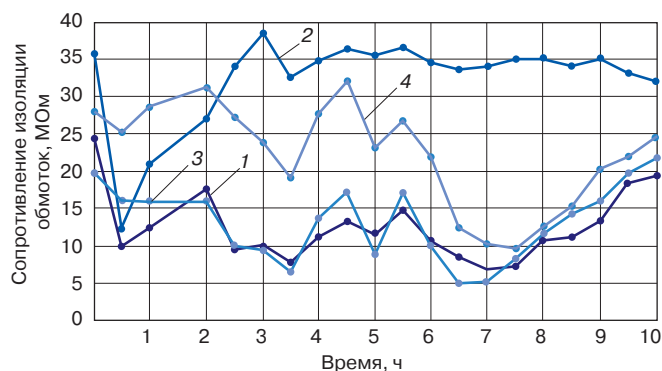


Рис. 12. Изменение сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 642 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой:
1 — группа ТЭД 1–2; 2 — группа ТЭД 3–4; 3 — группа ТЭД 5–6; 4 — группа ТЭД 7–8

Fig. 12. Change in 2ES6 No. 642 electric locomotive ETM insulation resistance in combined electroosmotic and electric heat drying system:
1 — Group ETM 1–2; 2 — Group ETM 3–4; 3 — Group ETM 5–6; 4 — Group ETM 7–8

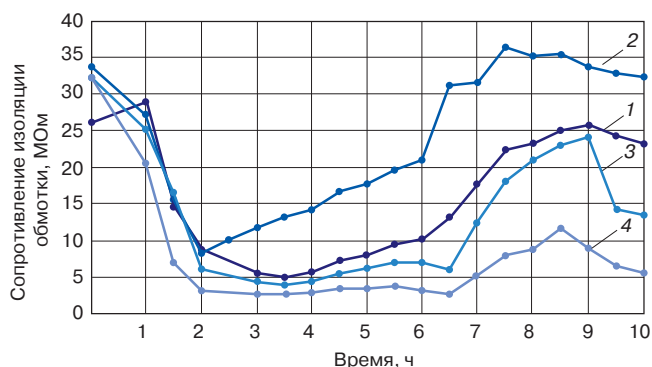


Рис. 13. Изменение сопротивления изоляции ТЭД электровоза 2ЭС6 № 407 при выполнении ЭОС совместно с электрокалориферной сушкой:
1 — группа ТЭД 1–2; 2 — группа ТЭД 3–4; 3 — группа ТЭД 5–6; 4 — группа ТЭД 7–8

Fig. 13. Change in 2ES6 No. 407 electric locomotive ETM insulation resistance in combined electroosmotic and electric heat drying system:
1 — Group ETM 1–2; 2 — Group ETM 3–4; 3 — Group ETM 5–6; 4 — Group ETM 7–8

(рис. 1) на 3–4 случая в месяц, обеспечивая повышение надежности электровозов.

Обсуждение. Авторы предлагают для практического применения ЭОС увлажненной изоляции ТЭД электровозов следующее:

1. ЭОС изоляции ТЭД электровозов совместно с электрокалориферной сушкой при осуществлении ТР-1 в условиях сервисного депо.

2. ЭОС изоляции ТЭД электровозов во время горячего простоя в период отрицательных температур окружающего воздуха.

Во втором случае технология ЭОС будет выполняться без сторонних приборов (устройств), только с использованием встроенных технических средств электровозов серии 2ЭС6. Положительный потенциал будет подаваться от контактной сети через токоприемник и далее в силовую цепь на обмотки ТЭД всех групп. Отрицательный потенциал напряжения контактной сети гальванически связан с корпусом ТЭД. На рис. 14 приведена силовая схема электровоза 2ЭС6 с указанием распространения положительного потенциала в режиме ЭОС.

Режим ЭОС будет проходить под контактной сетью при горячем простое электровозов (рис. 14). Напряжение подается на токоприемник ХА1, разъединитель QС1, быстродействующий выключатель QF1, дифференциальное реле КА1 и далее на обмотки ТЭД М1, М2, М3 и М4 — вся силовая схема будет образовывать положительный потенциал, рельсовая тяговая сеть — отрицательный потенциал. Поскольку во время эксплуатации электровоза используется независимое возбуждение, то для процесса ЭОС требуется переключить возбуждение на последовательное. Во время ЭОС для экономии электроэнергии пусковые реостаты R3 и R4 использоваться не будут, однако при слишком низком сопротивлении обмоток ТЭД напряжение можно ограничить с помощью замыкания соответствующих контакторов. Во время ЭОС электровоз передвигаться не будет. Пусковой реостат полностью выведен из работы. Положительный потенциал подается на ТЭД при замыкании контакторов: К1, К3, К27 QP1, QP3, К33, К2, К4, К28, QP2, QP4, К34. Ведомая секция замыкается по тому же принципу и питается от токоприемника ХА1. Регистрация уровня сопротивления изоляции происходит мегаомметрами МГМ-1 (на схеме UZ3, UZ4).

Данная ЭОС должна выполняться при работающих мотор-вентиляторах. Разработка технологии ЭОС изоляции обмоток ТЭД при горячем простое электровозов серии 2ЭС6 является темой дальнейших исследований авторов.

Применение указанной технологии сушки позволит повысить эксплуатационную надежность электроподвижного состава в целом за счет снижения отказов ТЭД в зимний период, как указано выше.

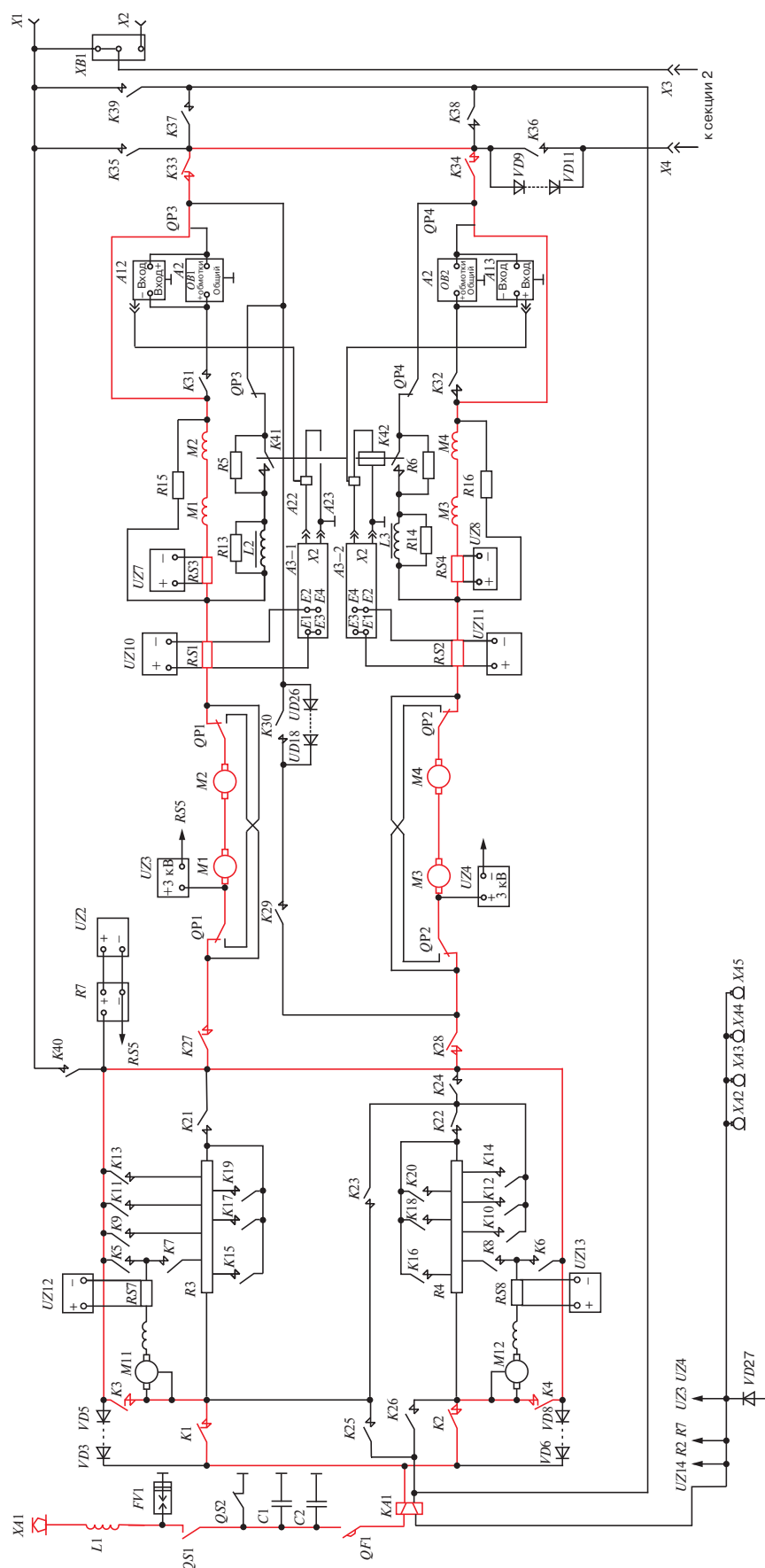


Рис. 14. Силовая схема электровоза 2ЭС6 в режиме проведения ЭОС

Fig. 14. Power circuit of 2ES6 electric locomotive in electroosmotic drying

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показывают эффективность использования электрокинетических явлений для сушки коллекторных ТЭД постоянного тока 810-й серии электровозов одновременно с электрокалориферными установками в условиях сервисного локомотивного депо. Расход электроэнергии при использовании электроосмотической сушки совместно с электрокалориферной снижается на 60 %, а время сушки на 20 %. Применение предлагаемой технологии повышения сопротивления увлажненной изоляции ТЭД позволит снизить количество отказов на 3–4 случая в месяц за счет повышения срока службы и более высокого качества восстановления показателей изоляции в период отрицательных температур воздуха, обеспечивая повышение надежности электровозов в эксплуатации.

Предлагаемый авторами способ осуществления сушки на электровозе при горячем простое требует экспериментального подтверждения своей эффективности, что является темой дальнейшего исследования.

Благодарности: авторы выражают благодарность сервисному локомотивному депо дирекции тяги за предоставление всего необходимого оборудования для проведения эксперимента, а также рецензентам за полезные замечания, способствовавшие дальнейшему улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the locomotive service depot of the traction Directorate for providing all the necessary equipment for the experiment, as well as to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Патент № 2661333 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 (2006.01). Способ сушки изоляции тяговых электродвигателей электровоза: № 2017109358: заявл. 20.03.2017; опубл. 16.07.2018 / Неустроев П. П., Шатравин К. М., Ушаков В. А.; патентообладатель ООО «Уральские локомотивы». 11 с. [Neustroev P. P., Shatravin K. M., Ushakov V. A. Patent No. 2661333. Russian Federation, MPK H02K 15/12 (2006.01). Method of drying the insulation of traction electric motors: No. 2017109358: appl. 20.03.2017, publ. 16.07.2018. 11 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/pfrel>.
2. Патент № 2324278 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 (2006.01). Способ сушки изоляции электрических машин: № 2006143925: заявл. 11.12.2006; опубл. 10.05.2008 / Коноваленко Д. В., Упырь Р. Ю., Худонов А. М. 4 с. [Konovalenko D. V., Upry R. Yu., Khudonogov A. M. Patent No. 2324278. Russian Federation,

MPK H02K 15/12 (2006.01). Method for electric machine insulation drying: No. 2006143925: appl. 11.12.2006, publ. 10.05.2008. 4 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zjeswd>.

3. Everett D. H. Manual of symbols and terminology for physico-chemical quantities and units. Appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. *Pure and Applied Chemistry*. 1972;31(4):577–638. <https://doi.org/10.1351/pac197231040577>.

4. Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Ф доровские чтения—2017: XLVII Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, Москва, 15–17 ноября 2017 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 166–170 [Nemirovskiy A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu. Electroosmotic drying and moisture protection of electrical equipment. In: *Fyodorovskiye Recitals—2017: XLVII International Scientific and Practical Conf. with science school elements, 15–17 November 2017, Moscow*. Moscow, MEI Publishing; 2017. p. 166–170 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xrdgod>.

5. Устройство электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований / А. Е. Немировский [и др.] // Ф доровские чтения—2020: L Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, Москва, 17–20 ноября 2020 г. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 285–290 [Nemirovskiy A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu., Mishchenko D. N. 0.4 kV Electric Motor Winding Electroosmotic Insulation Dryer for Experimental Research. In: *Fyodorovskiye Recitals—2020: International Scientific and Practical Conf. with science school elements, 17–20 November 2020, Moscow*. Moscow, MEI Publishing; 2020. p. 285–290 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/sqehwx>.

6. Повышение эффективности электроосмотической сушки изоляции активной части трансформаторов / А. Е. Немировский [и др.] // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ—2017): V Всерос. науч.-техн. конф. (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники), Тольятти, 1–2 ноября 2017 г. Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, 2017. С. 399–407 [Nemirovskiy A. E., Uskov Ya. A., Politsyna V. O., Nikiforova O. M. Increasing the efficiency of electroosmotic drying of the insulation of the active part of transformers. In: *Challenges of electrical engineering, electrical power engineering and electrical technology (PEEE—2017): V All-Russian Scientific and Technical Conf. (to 50th Anniv. the Dept of Elec. Supply & Elec. Engineering of the Institute of Energy and Electrical Engineering), 1–2 November 2017, Togliatti*. Togliatti: Togliatti State Univ.; 2017. p. 399–407 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zruckp>.

7. Иванов А. В. Электроосмотическая влагозащита электродвигателей // Электропитание. 2010. № 2. С. 63–64 [Ivanov A. V. Electroosmotic moisture protection of electric motors. *Power Supply*. 2010;(2):63–64 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yzmuoj>.

8. Немировский А. Е., Бугаков В. Г., Мороз Н. К. Устройство электроосмотической сушки изоляции электродвигателей, анализирующее амплитудно-частотные характеристики тока электроосмоса // Сборник научных трудов института: в 2-х т. Вологда: Вологодский политехн. ин-т, 1998. Т. 1. С. 78–82 [Nemirovskiy A. E., Bugakov V. G., Moroz N. K. An electroosmotic dryer of electric motor insulation, analysing the amplitude frequency response of the electroosmosis current. In: *Collection of the Institute's scientific papers: In 2 vols. Vol. 1*. Vologda: Vologda Polytechnic Institute; 1998. p. 78–82. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ylouvs>.

9. Кириллов С. В. Электроосмотическая сушка трансформаторов (опыт Мичуринской дистанции электроснабжения) // Локомотив. 2014. № 1 (685). С. 46 [Kirillov S. V. Electroosmotic drying of transformers (experience of the Michurinsk Power Supply Division). *Locomotive*. 2014;(1):46. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rzttfj>.

10. Усков Я. А. Электроосмотическая сушка изоляции обмоток в трансформаторе // Материалы межрегиональной научной конференции X ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых, Вологда, 23 ноября 2016 г.: в 4 т. / Вологодский гос. ун-т.

Вологда: Вологодский гос. ун-т, 2016. Т. 1. С. 54–58 [Uskov Ya. A. Electroosmotic drying of winding insulation in a transformer. In: *Proceedings of the Interregional Scientific Conference X Annual Scientific Session of Postgraduate Students and Young Scientists, 23 November 2016, Vologda: In 4 vols. Vol. 1. Vologda, Vologda State University; 2016. p. 54–58 (In Russ.)*]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yilrdv>.

11. Mills I., Cvita T., Homann K., Kallay N., Kuchitsu K. *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*. Second ed. Oxford: International Union of Pure and Applied Chemistry; 1993. 165 p.

12. McNaught A. D., Wilkinson A. *Compendium of Chemical Terminology. IUPAC Recommendations*. Second ed. Hoboken: Blackwell Science; 1997. 464 p.

13. Delgado Angel V., Arroyo Francisco J. Electrokinetic Phenomena and Their Experimental Determination: An Overview. In: Delgado Angel V., ed. *Interfacial Electrokinetics and Electrophoresis*. Boca Raton: CRC Press; 2002. p. 1–54. <https://doi.org/10.1201/9781482294668>.

14. Kijlstra J., van Leeuwen H. P., Lyklema J. Effects of surface conduction on the electrokinetic properties of colloids. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1992;88(23):3441–3449. <https://doi.org/10.1039/ft9928803441>.

15. Hunter R. J. *Zeta Potential in Colloid Science. Principles and Applications*. London: Academic Press; 1981. 386 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Александрович ТРЕТЬЯКОВ,

д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра подвижного состава электрических железных дорог, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 453775, <https://orcid.org/0000-0002-1570-5383>

Олег Владимирович БАЛАГИН,

канд. техн. наук, доцент, проректор по цифровой трансформации и связи с производством, доцент, кафедра локомотивов, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 267757, <https://orcid.org/0000-0001-7618-9397>

Сергей Владиславович ЖИВУШКО,

аспирант, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, ул. Карла Маркса, д. 35), Author ID: 1158103, <https://orcid.org/0009-0000-4238-512X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. TRETYAKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Rolling Stock of Electric Railways, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 453775, <https://orcid.org/0000-0002-1570-5383>

Oleg V. BALAGIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Vice-rector for Digital Transformation and Relations with Industry, Department of Locomotives, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 267757, <https://orcid.org/0000-0001-7618-9397>

Sergei V. ZHIVUSHKO,

Postgraduate, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Karl Marx St.), Author ID: 1158103, <https://orcid.org/0009-0000-4238-512X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Евгений Александрович ТРЕТЬЯКОВ. Постановка цели и задач работы. Разработка алгоритмов исследования, оценка результатов и формирование выводов. Проведение экспериментальных исследований. Подготовка текста рукописи (30%).

Олег Владимирович БАЛАГИН. Обоснование применения электроосмотической сушки на тяговом подвижном составе при эксплуатации и ремонте (10%).

Сергей Владиславович ЖИВУШКО. Сбор исходных данных. Проведение экспериментальных исследований. Структурирование и оформление результатов. Редактирование текста (60%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Evgeny A. TRETYAKOV. Setting goals and objectives. Formation of research algorithms, evaluation of results and formation of conclusions. Conducting experimental studies. Preparation of the manuscript text (30%).

Oleg V. BALAGIN. Justification of the use of electroosmotic drying on traction rolling stock during operation and repair (10%).

Sergei V. ZHIVUSHKO. Collection of source data. Conducting experimental studies. Data collection, structuring and processing. Text editing (60%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023, рецензия от первого рецензента получена 29.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 06.06.2023, принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 17.05.2023, first review received 29.05.2023, second review received 06.06.2023, accepted for publication 19.07.2023.

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».

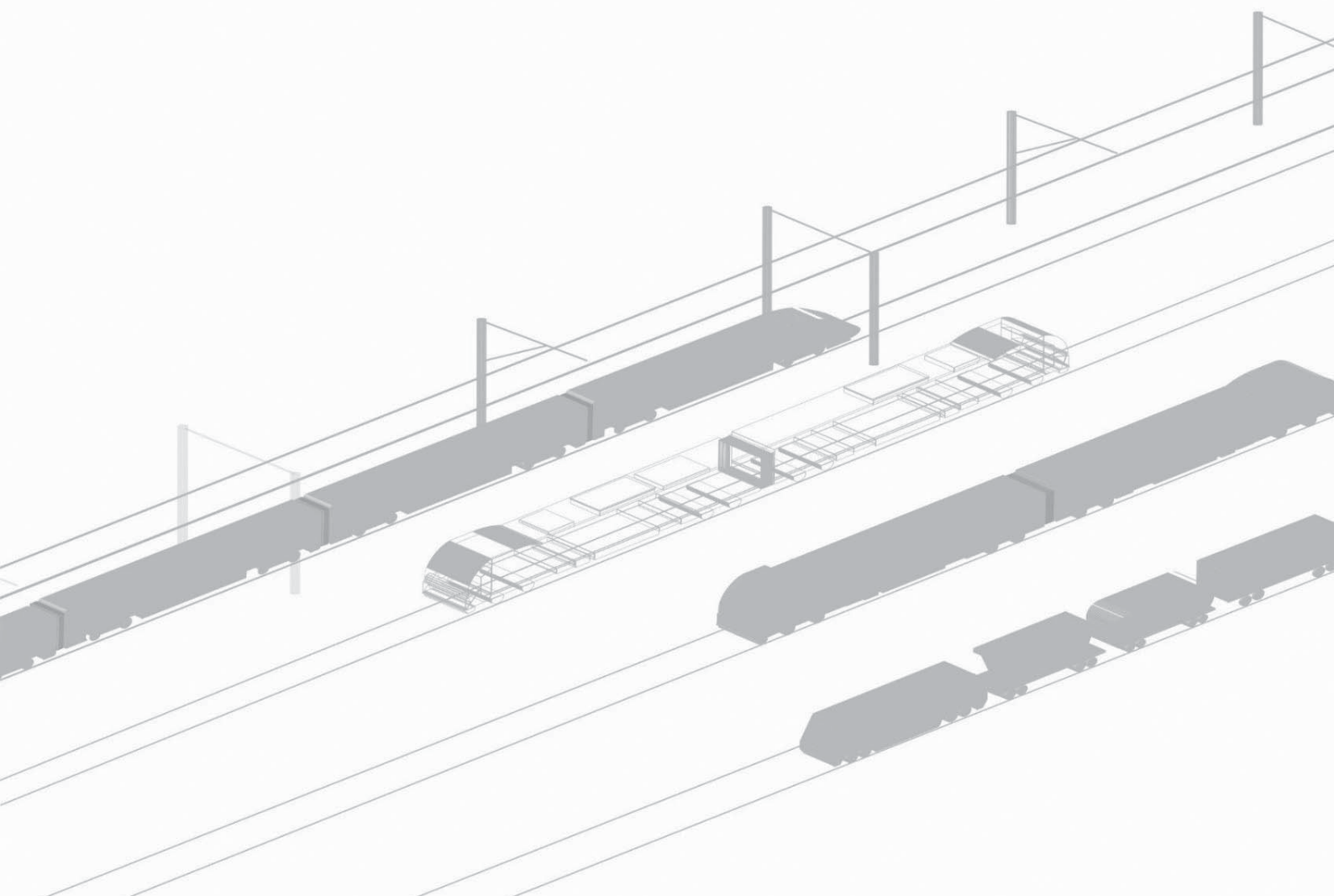
Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

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.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 629.4.054.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>

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



Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК

А. С. Ададунов^{1, 3}✉, И. Ю. Савельев¹, М. А. Чепулис², К. Г. Аринушкина^{1, 4}

¹ ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Научный информационно-аналитический центр ВНИИЖТ (НИАЦ ВНИИЖТ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ),

Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос разработки нового, более современного математического аппарата в системе автоматизированного контроля геометрических параметров колесных пар подвижного состава измерительного комплекса КОНЛОК. В комплексе используются бесконтактные лазерные 2D-профилометры для измерения параметров колес локомотивов при постановке в депо и вагонов в процессе их эксплуатации на железнодорожной инфраструктуре.

Материалы и методы. Применены методы математического моделирования с алгоритмами описания и оценки профиля колеса с учетом дополнительных требований на гладкость и непрерывность используемых функций. Выполнен анализ данных, полученных при фиксации фактического состояния профилей поверхности катания колесных пар грузовых вагонов, результаты сравнены с эталонным состоянием профиля поверхности катания колеса по ГОСТ 10791–2011.

Результаты. Разработан новый перспективный алгоритм описания и оценки профиля катания колеса. Точность измерения повышена за счет минимизации человеческого фактора, цифровизации технологических процессов и автоматизации контроля технического состояния подвижного состава в пути следования. Определены параметры профиля поверхности катания колеса грузового вагона с наработкой 450 тыс. км.

Обсуждение и заключение. Представленный алгоритм обработки данных позволяет бесконтактно и автоматизированно измерять геометрические параметры колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава, а также пассажирских и грузовых вагонов в движении на основе полученных с лазерного профилометра данных, а также автоматизировать процесс составления отчета о результатах измерения, включая информацию об обследуемом объекте, и рекомендациях по принятию решения об отправке колеса в ремонт. Применение новых алгоритмов и современных технических средств позволяет получать точные и надежные данные о геометрических параметрах колесной пары, производить перспективный анализ износа колесной пары в эксплуатации без обязательного обмера ручными средствами измерения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, колесная пара, лазерный профилометр, геометрические параметры колесных пар, дефекты поверхности катания колеса, неисправности колесных пар, КОНЛОК

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ададунов А. С., Савельев И. Ю., Чепулис М. А., Аринушкина К. Г. Разработка перспективного алгоритма расчета и оценки геометрических параметров колесной пары в комплексе КОНЛОК // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 247–256. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>.

✉ a.adadurov@vniizht-e.ru (А. С. Ададунов)

© Ададунов А. С., Савельев И. Ю., Чепулис М. А.,
Аринушкина К. Г., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.054.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>

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



Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the CONLOC system

Aleksandr S. Adadurov^{1, 3}✉, Igor Yu. Savelev¹,
Michael A. Chepulis², Kseniya G. Arinushkina^{1, 4}

¹VNIIZhT-ENGINEERING,

St. Petersburg, Russian Federation

²VNIIZhT Scientific Information and Analytics Centre,

St. Petersburg, Russian Federation

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

St. Petersburg, Russian Federation

⁴Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications,

St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors examine the development of new, updated mathematics in the automated control of the geometry of rolling stock wheel pairs for the CONLOC measuring system. The system uses non-contact 2D laser profile gauges to measure the parameters of locomotive wheels when they are placed in a depot and cars during their operation on the railway.

Materials and methods. The researchers apply mathematical models with algorithms for describing and assessing the wheel profile given additional requirements to the smoothness and continuity of the functions in use. The paper analyses actual data on the state of the tread profiles of wheel pairs of wagons, and compared the results with the reference state of the tread surface profile under GOST 10791–2011.

Results. The authors develop a new promising algorithm for describing and assessing the wheel rolling profile and improved the measurement accuracy by reducing the human factor, digitalising processes and automating the monitoring of the health of rolling stock along the route. The research determine the parameters of the tread surface profile of a wagon wheel with an operating time of 450 thousand kilometers.

Discussion and conclusion. This data processing algorithm provides for non-contact and automated measurement of the geometry of wheel pairs of locomotives and multi-unit rolling stock, as well as passenger carriages and wagons in motion based on laser profile gauge data, as well as automated measurement reporting process, including information on the object under examination, and repair recommendations. The new algorithms and modern hardware provide accurate and reliable data on wheel pair geometry, predict the operating wear of the wheel pair without the need for manual measurements.

KEYWORDS: railway transport, wheel pair, laser profile gauge, wheel pair geometry, tread surface defects, wheel pair malfunctions, CONLOC

FOR CITATION: Adadurov A. S., Savelev I. Yu., Chepulis M. A., Arinushkina K. G. Development of an advanced algorithm for calculating and assessing the wheel pair geometry in the CONLOC system. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):247-256. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-247-256>.

✉ a.adadurov@vniizht-e.ru (A. S. Adadurov)

© Adadurov A. S., Savelev I. Yu., Chepulis M. A.,
Arinushkina K. G., 2023

Введение. Внедрение различного рода средств диагностики инфраструктуры и подвижного состава направлено на повышение эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта. В содержание этого направления входит в том числе разработка комплекса мероприятий по сокращению непроизводительных потерь при обслуживании и ремонте инфраструктуры железнодорожного транспорта и подвижного состава. Важными составляющими являются обеспечение безопасности движения поездов и рациональное расходование ресурса верхнего строения рельсового пути за счет контроля состояния колесных пар [1, 2].

На сегодняшний день на сети используются как ручные средства измерения геометрических параметров профиля колес, так и автоматизированные системы [3–5]. В частности, на железных дорогах применяются различные системы, которые бесконтактным способом осуществляют измерения геометрических параметров бандажей колесных пар подвижного состава на ходу поезда в автоматическом режиме, регистрируют и обрабатывают результаты измерений, идентифицируют подвижной состав и колесную пару (колесо), оперативно передают полученную информацию на автоматизированные рабочие места в пункт технического обслуживания подвижного состава [5–10].

Для проведения дистанционного измерения геометрических параметров колесной пары, например, используется система контроля колесных пар на ходу 3DWheel. Система предназначена для бесконтактного автоматического измерения геометрических параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава (локомотивов, грузовых вагонов, вагонов метрополитена, трамваев) в реальном времени и использует комбинацию лазерных 2D-сканеров, установленных по обе стороны рельса. Система внесена в Реестр средств измерений, испытательного оборудования и методик измерений, применяемых в ОАО «РЖД». Недостатками данной системы являются ее дороговизна по сравнению с ручными средствами измерения и допускового контроля (шаблонами) и сложность выполнения калибровки в процессе длительной эксплуатации [11].

Также имеется возможность применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона, однако для описания профиля поверхности колеса используется ступенчатая функция, что не удовлетворяет новым

требованиям по обеспечению гладкости применяемых функций [12].

Каждое средство диагностики с различными системами сканирования может модернизироваться в соответствии с повышением требований к таким средствам диагностики или изменением (предъявлении вновь) требований государственных стандартов на сами изделия — объекты измерений и контроля. В данной работе более подробно рассмотрен комплекс КОНЛОК, предназначенный для проведения автоматических бесконтактных измерений геометрических параметров подвагонного пространства, в том числе колесных пар подвижного состава.

Комплексы цифровые диагностические для измерений геометрических параметров колесных пар подвижного состава «Комплекс-2 КОНЛОК» предназначены для проведения измерений геометрических параметров (например, толщина гребня, толщина обода) колес цельнокатанных, изготовленных по ГОСТ 10791–2011¹, колесных пар железнодорожных вагонов, изготовленных по ГОСТ 4835–2013², на ходу поезда в автоматическом режиме, регистрации показаний бесконтактным способом и оперативной передачи по результатам мониторинга полученной информации на ближайший пункт технического обслуживания грузовых вагонов или пункт технического обслуживания локомотивов. Комплекс КОНЛОК производит измерения геометрических параметров колесных пар при скорости прохождения подвижного состава через комплекс до 120 км/ч и обеспечивает выполнение следующих функций:

- автоматического тестирования функциональных блоков, узлов и установки в целом;
- автоматического включения измерительного режима при приближении объекта измерения к контрольной точке измерения в рабочей зоне датчиков;
- передачи и отображения в интерфейсе автоматизированного рабочего места обслуживающего персонала геометрических параметров подвагонного пространства и сопутствующей информации.

Комплекс прошел испытания в целях утверждения типа средств измерений, и в соответствии с приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Росстандарт) от 03.09.2021 г. № 1940 «Об утверждении типов средств измерений» на Комплекс утверждены тип и описание типа средства измерений. Комплексу присвоен регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений — 82914–21.

¹ ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия: дата введения 2012-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 40 с.

² ГОСТ 4835–2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 30 с.

Цель работы — разработка нового перспективного алгоритма описания и оценки текущего состояния профиля колеса по данным с комплекса КОНЛОК с учетом таких дополнительных требований, как гладкость и непрерывность получаемого профиля, в том числе и по данным с частичными пропусками точек в профиле. Это позволит более точно определять

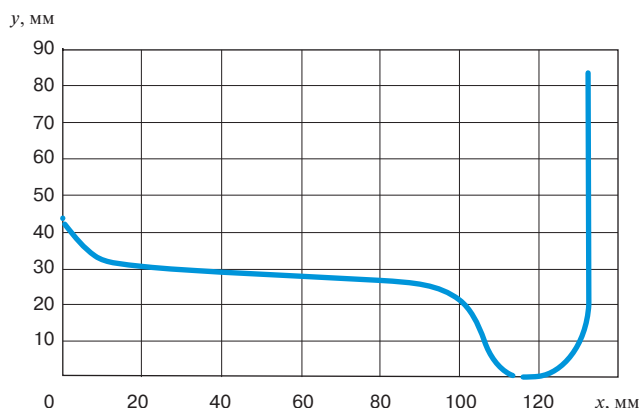


Рис. 1. Облако точек границы профиля колеса

Fig. 1. Wheel profile boundary point cloud

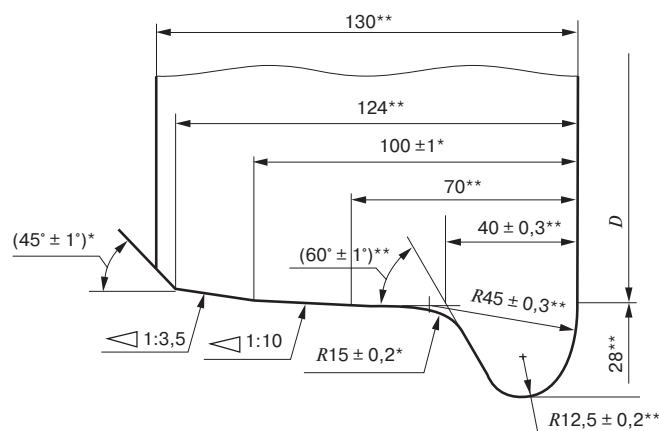


Рис. 2. Профиль колеса для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов, специального железнодорожного подвижного состава

Источник: ГОСТ 10791–2011 (приложение Б)³

* Размеры для справок.

** Размеры обеспечиваются инструментом.

Fig. 2. Wheel profile for wheel pairs of locomotive-hauled freight car truck and passenger carriages, non-motor cars of electric and diesel trains, special railway rolling stock

Source: GOST 10791–2011 (Appendix B)³

* Dimensions for reference only.

** Dimensions are ensured with a tool.

геометрические параметры, а следовательно, уменьшит количество ошибочных решений о постановке подвижного состава в неплановый ремонт.

Постановка задачи. Как уже сказано выше, комплекс КОНЛОК является системой бесконтактного измерения в автоматическом режиме геометрических параметров бандажей колесных пар подвижного состава в движении. Данный комплекс применяется для измерения колесных пар как локомотивов и моторов-вагонного подвижного состава, так и пассажирских и грузовых вагонов.

Среди определяемых комплексом показателей есть те, которые напрямую связаны с бандажом колеса:

- толщина гребня колеса;
- ширина обода колеса или бандажа;
- кольцевые выработки на поверхности катания у основания гребня колеса;
- разность толщин гребней колес в одной колесной паре.

В статье рассмотрен и описан алгоритм для определения параметров профиля поверхности катания колеса грузового вагона, который применим и для тягового подвижного состава. Авторы статьи использовали в качестве исходных данных облако точек, полученное на основе изображений с ПЗС-матрицы оптических датчиков приемника лазерного сигнала, отраженного от поверхности катания цельнокатаного колеса грузового вагона колеи 1520 мм, изготовленного по ГОСТ 10791–2011. Нарботка конкретной колесной пары составила ~450 000 км.

Облако точек (рис. 1) представляет собой множество пар $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, задающих границу профиля, точнее, траекторию луча лазера, отраженного от границы профиля. Так как измерение положения границы профиля происходит с погрешностью, а в некоторых местах возможны пропуски детектирования (например, луч оказался чем-то перекрыт), то естественным продолжением задачи поиска границы профиля становится задача регрессии. Решение данной задачи осуществляется средствами классического регрессионного анализа [13].

Эталонный профиль колеса соответствует конструкции и размерам колес для колесных пар тележек грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов, специального железнодорожного подвижного состава и представлен в ГОСТ 10791–2011 и ГОСТ 11018–2011⁴. Данный профиль должен соответствовать профилю на рис. 2. Допустимые условия эксплуатации, определяемые в нормативных документах, являются уникальными для каждого типа колес.

³ ГОСТ 10791–2011. С. 25.

⁴ ГОСТ 11018–2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия: дата введения 01.01.2013. М.: Стандартинформ, 2012. 30 с.

На рис. 3 представлено описание профиля колеса с помощью функций. Однако в процессе эксплуатации геометрия колеса изменяется, из-за чего классами исходных функций становится невозможно описать новую (текущую) форму профиля с достаточной точностью. Поэтому было решено разработать описание профиля при помощи регрессионных моделей и класса кусочно-полиномиальных функций. Примерная структурная схема оценки параметров профиля колеса представлена на рис. 4.

Для описания профиля колеса использован класс линейных моделей, а точнее, полиномиальные модели. В целях уменьшения эффекта переобучения математической модели — эффекта снижения точности результатов из-за избыточной сложности модели — область определения разбивалась на отрезки (сегменты), на каждом из которых используется полином низкой степени, не выше пятой. Выбор границ сегментов при реализации нового алгоритма работы будет рассмотрен ниже.

Решение задачи регрессии нашлось в классе кусочно-полиномиальных функций. В дальнейшем границы области определения каждой части кусочной функции будем называть точками разладки или точками сшивки. Таким образом, решение имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} f(x; \beta_0), x < x_1; \\ f(x - x_1; \beta_1), x_1 \leq x < x_2; \\ \dots \\ \dots \\ f(x - x_{k-1}; \beta_{k-1}), x > x_{k-1}, \end{cases} \quad (1)$$

где k — количество сегментов; $\beta = (\beta^{(0)}, \dots, \beta^{(p)})$ — коэффициенты полинома, где p — степень полинома; $f(x; \beta) = \beta^{(0)} + \beta^{(1)}x + \dots + \beta^{(p)}x^{(p)} = \sum_{j=0}^p \beta^{(j)}x^{(j)}$ — полиномиальная функция.

В точках сшивки на значения функции накладываются дополнительные условия:

- 1) $f(x_i; \beta_i) = f(x_i; \beta_{i+1})$ — непрерывность самой функции;
- 2) $f'(x_i; \beta_i) = f'(x_i; \beta_{i+1})$ — непрерывность первой производной, что равносильно отсутствию изломов функции в точках разладки.

При использовании класса полиномиальных функций, ограничения приобретают следующий вид:

- 1) $\beta_{i+1}^{(0)} = f_i(x_i), i > 1$ — непрерывность функции;
 - 2) $\beta_{i+1}^{(1)} = f'_i(x_i), i > 1$ — непрерывность производной,
- где $f_i(x) = f(x - x_i; \beta_i)$.

Тем самым на каждом сегменте (кроме первого) фиксируются значения двух коэффициентов, а итоговое количество параметров в модели становится равно

$$(p+1)k - 2(k-1) = pk - k + 2. \quad (2)$$

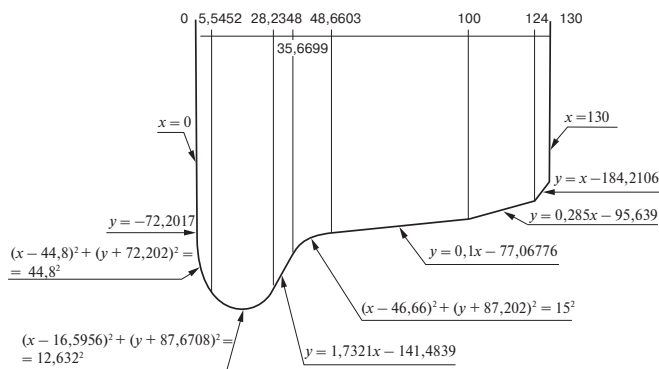


Рис. 3. Профиль обода колеса, описанный функциями

Fig. 3. Wheel tread profile as described by functions



Рис. 4. Структурная схема оценки параметров профиля колеса

Fig. 4. Block diagram for estimating wheel profile parameters

Безусловно, задача выбора положений точек разладки — отдельный вопрос, так как в рамках одного сегмента модель является неизменной. Решать его можно различными путями, в частности статистически оценивать вероятность наличия точки разладки

в том или ином месте, например, методом Чоу, применяемым в эконометрике. Эта процедура представляет собой проверку стабильности параметров регрессионной модели, наличия структурных сдвигов в выборке. Фактически тест проверяет неоднородность выборки в контексте регрессионной модели [14, 15]. Однако при проведении натурных экспериментов оказалось достаточно применения простого равномерного распределения точек по исходному множеству, т. е. деления исходного множества пар на подмножества сравнимой мощности.

Обработка сигнала. В кадре профиль колеса ограничен с краев вертикальными прямыми. Вертикали плохо описываются полиномиальными моделями, так как, по сути, они требуют бесконечно больших по модулю коэффициентов. Поэтому для решения задачи регрессии предварительно была выделена область построения регрессионной модели (профиль колеса между вертикальными границами), т. е. боковые вертикали были отделены от профиля поверхности катания, а также были определены количество и положение границ сегментов.

Все облако точек можно разбить на 3 подмножества (рис. 5):

- 1) левая вертикаль;
- 2) нижняя часть профиля колеса;
- 3) правая вертикаль.

Нижняя часть профиля ограничена вертикалями, однако из-за погрешностей измерения для их определения не получалось выбрать максимальные и минимальные координаты по оси абсцисс. Вместо этого было принято решение по поиску «нижней правой» и «нижней левой» точек профиля колеса. Для этого достаточно было выбрать точку вне колеса, далее определить ближайшую к ней точку самого профиля,

а в качестве меры расстояния была использована стандартная евклидова мера на плоскости

$$\forall x, y \in R^2, d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}. \quad (3)$$

Основная задача заключалась именно в выборе внешней точки, к которой определяется ближайшая точка профиля. Для определения «нижней левой» точки необходимо отступить от профиля вниз и влево, аналогично и для «нижней правой» — вниз и вправо. Варьируя величину отступа по разным осям, можно влиять на результат. Эмпирически были подобраны следующие величины:

- $x_{\min}$ — наименьшее значение по оси абсцисс;
- $x_{\max}$ — наибольшее значение по оси абсцисс;
- $y_{\min}$ — наименьшее значение по оси ординат;
- $y_{\max}$ — наибольшее значение по оси ординат;
- $width = x_{\max} - x_{\min}$ — ширина облака точек;
- $height = y_{\max} - y_{\min}$ — высота облака точек.

Соответственно, были определены координаты крайних точек профиля колеса с правой и левой сторон, по которым строятся вертикали:

- 1) левой нижней: $(x_{\min} - width, y_{\min})$;
- 2) левой верхней: $(x_{\min} - width, y_{\min} + 1,2height)$;
- 3) правой нижней: $(x_{\max} + 30width, y_{\min})$;
- 4) правой верхней: $(x_{\max} + 30width, y_{\min} + 1,2height)$.

Далее, имея границы вертикали, авторы разбили по ним облако точек на три подмножества:

- 1) от левой верхней до левой нижней — левая вертикаль;
- 2) от левой нижней до правой нижней — профиль колеса;
- 3) от правой нижней до правой верхней — правая вертикаль.

Так как ранее уже были определены множества точек, относящиеся к вертикалям, оставалось выбрать медианы этих множеств в качестве оценки положения вертикалей. Была использована именно медиана, а не выборочное среднее, например, так как она более устойчива к выбросам в данных и ошибкам измерений.

Аналитическое представление профиля колеса. Ранее был определен рассматриваемый класс функций — кусочно-полиномиальные с непрерывной нулевой и первой производными с суммарным числом параметров, равным

$$pk - k + 2.$$

Модель строилась только на множестве точек, которое составляет область основного интереса, т. е. для нижней части профиля колеса.

Для определения значений параметров модели использовался градиентный спуск и его реализация в библиотеке `numru` для языка программирования Python. Результат кусочно-полиномиальной регрессии

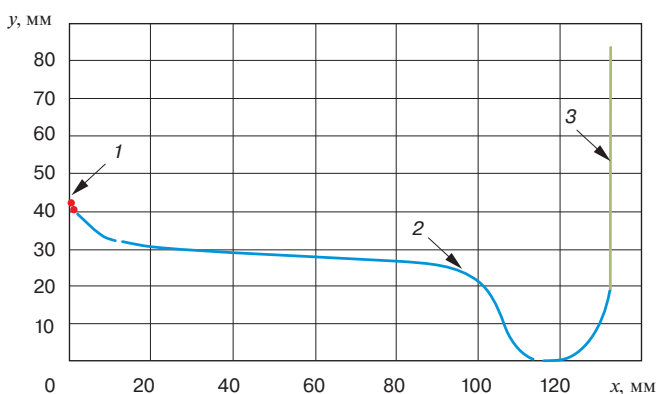


Рис. 5. Профиль колеса с выделенными подмножествами:
1 — левая вертикаль; 2 — нижняя часть профиля колеса;
3 — правая вертикаль

Fig. 5. Wheel profile with subsets highlighted:
1 — left vertical; 2 — wheel profile bottom;
3 — right vertical

с параметрами $p=5, k=8$ представлен на рис. 6. По нему видно, что все пропуски (например, в районе гребня) обработаны корректно и линия регрессии повторяет форму профиля.

Определение параметров колеса. Аналогично тому, как к реальному колесу для измерений прикладывается шаблон в качестве средства допускового контроля, так и в предлагаемом методе производятся замеры в точках согласно «виртуальному шаблону». Шаблон опирается на правую вертикаль и нижнюю точку гребня.

Алгоритм нахождения вертикали описан ранее (рис. 4), задача определения нижней точки гребня решается путем нахождения глобального минимума функции профиля на области определения, так как данные точки должны быть тождественны. Поиск данного минимума можно свести к определению минимального значения среди локальных минимумов для каждого из сегментов, так как на каждом сегменте функция имеет весьма простую структуру. Следует отметить, что в случае, когда нижняя точка гребня оказывается на границе сегментов, привязки шаблона могут искажаться, следовательно, и все прочие контрольные точки измерения теряют привязку. Данная проблема решена путем добавления «гладкости» профиля при сшивке сегментов и выбора количества сегментов.

Когда опорные точки определены, положение всех прочих контрольных точек можно задать через них согласно упомянутым ГОСТам или иному нормативному документу (в зависимости от типа подвижного состава), после чего рассчитать ключевые параметры колеса.

Результаты исследования. На основе математической модели, построенной по облаку точек, были вычислены ключевые параметры колеса, представленные в таблице. Восстановленный профиль с параметрами колеса показан на рис. 7. В рамках статьи было рассмотрено только одно колесо, поскольку его данные были репрезентативными, а также содержали пропущенные значения.

Решение о необходимости отправки колесной пары на ремонт (в обточку) может быть принято согласно допустимым диапазонам, определяемым в нормативных документах, которые являются уникальными для каждого типа колес (таблица)⁵.

Полученные значения параметров исследуемого колеса соответствуют допустимым диапазонам,

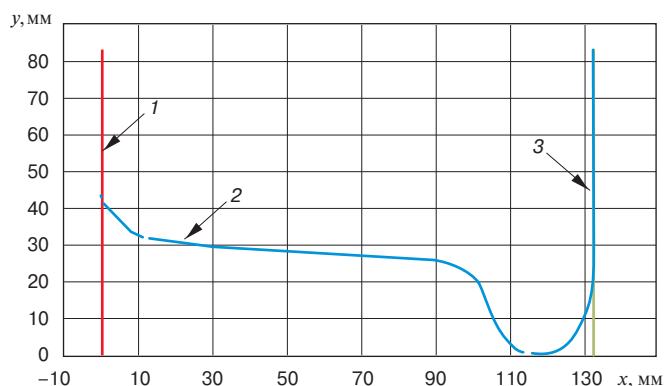


Рис. 6. Профиль колеса, построенный согласно модели кусочно-полиномиальной регрессии, $p=5, k=8$:
1 — левая вертикаль; 2 — нижняя часть профиля колеса;
3 — правая вертикаль

Fig. 6. Wheel profile built on a piecewise polynomial regression model, $p=5, k=8$:
1 — left vertical; 2 — wheel profile bottom;
3 — right vertical

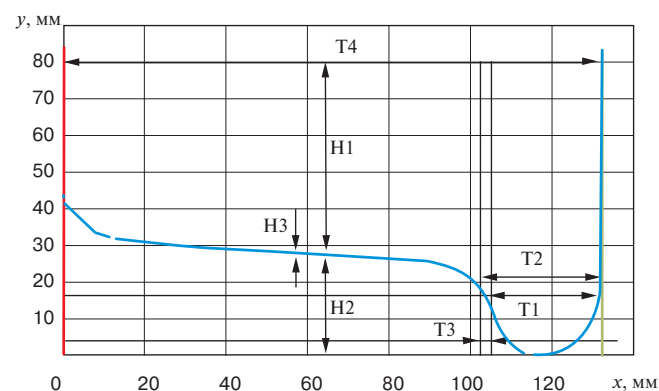


Рис. 7. Восстановленный профиль с параметрами колеса:
H1 — толщина обода колеса или бандаж; H2 — высота гребня;
H3 — прокат по кругу катания; T1 — толщина гребня на расстоянии 18 мм от вершины; T2 — толщина гребня на расстоянии 20 мм от вершины; T3 — крутизна гребня; T4 — ширина обода или бандаж

Fig. 7. Recovered profile with the wheel parameters:
H1 — wheel tread or tyre thickness; H2 — ridge height;
H3 — rolling circle; T1 — ridge thickness at 18 mm from the apex;
T2 — ridge thickness at 20 mm from the apex; T3 — ridge steepness;
T4 — tread or tyre width

определенным распоряжением ОАО «РЖД»⁶. Следовательно, данное колесо не будет забраковано, и его эксплуатация на подвижном составе будет продолжена.

⁵ Об утверждении Инструкции по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 22 декабря 2016 г. № 2631р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=679861&demo=1> (дата обращения: 10.04.2023); Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осматривающему вагонов) № 808-2022 ПКБ ЦВ [Электронный ресурс]: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества: протокол от 8 декабря 2022 г. № 77. URL: <https://mintrans.gov.ru/storage/app/media/files/instr-808-2022.pdf?ysclid=1l0pu5l3xl704765662> (дата обращения: 10.04.2023).

⁶ Об утверждении Инструкции по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 22 декабря 2016 г. № 2631р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=679861&demo=1> (дата обращения: 10.04.2023).

Таблица
Ключевые параметры цельнокатаного колеса грузового вагона

Table

Key parameters of a solid-rolled wagon wheel

Параметр	Расшифровка параметра	Допустимый диапазон, мм	Полученное значение, мм
T1	Толщина гребня на расстоянии 18 мм от вершины	25–33	29,42
T2*	Толщина гребня на расстоянии 20 мм от вершины	—	31,07
T3*	Крутизна гребня	—	3,80
T4	Ширина обода или бандажа	126–133	132,04
H1	Толщина обода колеса или бандажа	>25	55,56
H2*	Высота гребня	—	27,70
H3	Прокат по кругу катания (разница проката эталонного колеса от исследованного)	0–7	0,30

* Данные параметры для исследуемого колеса не регламентированы.

* These parameters for the wheel under study are not regulated.

Ранее в комплексе КОНЛОК применялось описание профиля колеса с помощью ступенчатых функций, что не удовлетворяло новым требованиям к гладкости используемых функций. Разработанный алгоритм описания профилей учитывает дополнительные требования, что позволяет более точно описывать реальный объект.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты полностью соответствуют текущим целям работы, поставленные задачи выполнены в полном объеме. Были определены параметры колеса, обработка которых реализована по новому перспективному алгоритму, представленному в статье. Новый алгоритм описания и оценки профиля колеса учитывает дополнительные требования на гладкость и непрерывность используемых функций. Проверка производилась на цельнокатаных колесах грузового вагона колеи 1520 мм по ГОСТ 10791–2011.

Представленный алгоритм обработки данных позволяет бесконтактно и автоматизированно измерять геометрические параметры колесных пар подвижного состава в движении на основе данных, полученных с лазерного профилометра. Также данный алгоритм позволяет автоматизировать составление отчета о результатах

измерения, включая информацию об обследуемом объекте, и рекомендациях по принятию решения об отправке колеса в ремонт.

Основные ограничения алгоритма связаны с необходимостью получения данных с низким уровнем шума и ограниченным множеством оцениваемых видов колес. Каждый вид колеса требует отдельного подхода по причине отсутствия универсальных нормативных документов. Скорость съема данных также ставит ограничение на допустимую скорость движения поезда (до 120 км/ч).

В сравнении с данными обмеров, выполняемых ранее ручным методом, представленный алгоритм показал большую скорость и лучшую точность измерений без потери качества.

Совершенствование метода обработки данных связано с увеличением допустимой скорости движения состава за счет оптимизации механизма снятия и передачи данных, увеличения скорости обработки данных и качества передаваемых данных в суровых погодных условиях. Снег, дождь, град являются серьезными помехами, зашумляющими исходный сигнал. Также дальнейшая разработка может быть направлена на увеличение разнообразия типов анализируемых колесных пар, так как допустимые условия эксплуатации, определяемые в нормативных документах, являются уникальными для каждого типа колес.

Обязательным дальнейшим шагом адаптации нового алгоритма становится реализация модели перспективного анализа расчета износа колес и формирование цифровых двойников колесных пар, пройденных через комплекс КОНЛОК, на весь жизненный цикл эксплуатации колеса.

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

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

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Влияние структуры и механических характеристик колесных стальных на изнашивание и режимы восстановления профиля

колесных пар / В.С. Кушнер [и др.]; под ред. И.А. Иванова, В.С. Кушнера. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2015. 224 с. [Kushner V.S., Krut'ko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E. *The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheel pairs*. Omsk: Publishing house of OmSTU; 2015. 224 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/vcbhmv>.

2. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О.С. Валинский [и др.]. Казань: Бук, 2022. 324 с. [Valinskiy O.S., Vorobyov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kerentsev D.E., Krotov S.V., et al. *Improving the performance of wheel pairs of rolling stock*. Kazan: Buk; 2022. 324 p. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/txahyi>.

3. Ададуров А.С., Савельев И.Ю. Обзор существующих установок автоматизированного бесконтактного измерения геометрических параметров колесных пар // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 3(100). С. 48–51 [Adadurov A.S., Savelyev I.Yu. Review of existing installations for automated contactless measurement of geometric parameters of wheel pairs. *Transport of the Russian Federation*. 2022;(3):48-51. (In Russ.)]. EDN <https://www.elibrary.ru/lmfxxq>.

4. Ададуров А.С., Усмендеева А.Д. Система мониторинга состояния подвижного состава для формирования оптимизированных и сбалансированных планов ремонта и эксплуатации (часть 1) // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2018. № 3(43). С. 66–71 [Adadurov A.S., Usmendeeva A.D. The rolling stock condition monitoring system for the formation of optimized and balanced repair and maintenance plans (part 1). *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2018;(3):66-71. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xvvjad>.

5. Ададуров А.С., Тюпин С.В., Лапин А.М. Техническая диагностика колесных пар: современные методы и средства выявления дефектов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2013. № 4(24). С. 32–35 [Adadurov A.S., Tyupin S.V., Lapin A.M. Wheel set technical diagnosis: innovative methods of defect detection. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2013;(4):32-35 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ritrj>.

6. Li C., Luo S., Cole C., Spiryagin M. An overview: modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Vehicle System Dynamics*. 2017;55(7):1045–1070. <https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1296963>.

7. Буйносов А.П. Разработка и аппаратная реализация прибора для измерения геометрических параметров бандажей колесных пар // Транспорт Урала. 2010. № 3. С. 64–68 [Buynosov A. P. Development and hardware realization of the device for geometrical parameters of wheel pairs bandages measurement. *Transport of the Urals*. 2010;(3):64-68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/mvlhlyt>.

8. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Трофимов М.Н. Новый измерительный прибор // Локомотив. 1998. № 6. С. 40–41 [Buynosov A. P., Tsikhalevskiy I. S., Trofimov M. N. The new measuring instrument. *Locomotive*. 1998;(6):40-41. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yruwkwf>.

9. Репин М.Ю. Анализ приборов и устройств для контроля геометрических параметров бандажей колесных пар локомотивов // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 20 января 2018 г. Уфа: Аэтерна, 2018. Ч. 2. С. 107–112 [Repin M. Yu. Analysis of equipment and devices for monitoring geometric parameters of locomotive wheel pairs bandages. In: *Scientific revolutions: essence and role in the development of science and technology: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 20 January 2018, Ufa*. Ufa: Aeterna; 2018. Part 2. p. 107–112. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yozsov>.

10. Комиссаров А.В., Григорьев К.В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 3. С. 14–15 [Komissarov A. V., Grigoriev K. V. Automated diagnostic complex for measuring geometrical parameters of wheel sets. *Vagony i vagonnoe хозяйство*. 2011;(3):14-15. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/obfasb>.

11. Нуриев А.Г., Чистяков Э.Ю., Битюцкий Н.А. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 7–18 [Nuriev A. G., Chistyakov E. Yu., Bityutskiy N. A. Development of the Usage of Remote Measurements to Define Wheelset Geometric Parameters. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2023;(1):7-18. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-1-7-18>.

12. Лексотов И.С., Клюка В.П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности катания колеса вагона // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 51–63 [Leksutov I. S., Klyuka V. P. To the possibility of using a linear scanner to create means of technical control of geometric parameters of the longitudinal section of the rolling surface of the railcar wheel. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;(3):51-63. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/tnmfx>.

13. Kutner M., Nachtsheim C., Neter J. *Applied Linear Regression Model*. 4th Edition. New York: McGraw Hill; 2004. 701 p.

14. Chow G. C. Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions. *Econometrica*. 1960;28(3):591–605. <https://doi.org/10.2307/1910133>.

15. Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М. Случайные процессы: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 3-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 447 с. [Volkov I. K., Zuev S. M., Tsvetkova G. M. *Random processes: coursebook for technical universities*. 3rd ed., corrected. Moscow: Bauman MGTU Publishing; 2006. 447 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич АДАДУРОВ,

канд. техн. наук, генеральный директор, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б); доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), Author ID: 540870, <https://orcid.org/0000-0002-9520-4596>

Игорь Юрьевич САВЕЛЬЕВ,

главный инженер, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б), Author ID: 1209857, <https://orcid.org/0009-0002-7511-7740>

Михаил Артемович ЧЕПУЛИС,

главный программист, Научный информационно-аналитический центр ВНИИЖТ (НИАЦ ВНИИЖТ, 196128, г. Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 10, стр. 1), <https://orcid.org/0000-0001-7340-9323>

Ксения Геннадьевна АРИНУШКИНА,

инженер-технолог, ВНИИЖТ-ИНЖИНИРИНГ (197022, г. Санкт-Петербург, пр. Медиков, д. 9Б); аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ, 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1), Author ID: 1163437, <https://orcid.org/0000-0002-1156-2071>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. ADADUROV,

Cand. of Sci. (Eng.), General Director, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.); Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, St. Petersburg, 9, Moskovskiy Ave.), Author ID: 540870, <https://orcid.org/0000-0002-9520-4596>

Igor Yu. SAVELEV,

Chief Engineer, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.), Author ID: 1209857, <https://orcid.org/0009-0002-7511-7740>

Michael A. CHEPULIS,

Chief Programmer, VNIIZhT Scientific Information and Analytics Centre (196128, St. Petersburg, 10/1, Blagodatnaya St.), <https://orcid.org/0000-0001-7340-9323>

Kseniya G. ARINUSHKINA,

Process Engineer, VNIIZhT-ENGINEERING (197022, St. Petersburg, 9B, Medikov Ave.); Postgraduate, Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications (193232, St. Petersburg, 22/1, Bolshhevikov Ave.), Author ID: 1163437, <https://orcid.org/0000-0002-1156-2071>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Сергеевич АДАДУРОВ. Научное руководство, рецензирование, описание общей идеи, постановка задачи (35%).

Игорь Юрьевич САВЕЛЬЕВ. Руководство внедрением комплекса, корректировка результатов с учетом понимания процессов эксплуатации подвижного состава (10%).

Михаил Артемович ЧЕПУЛИС. Описание математического аппарата, написание программного кода для обработки сигналов, написание и редактирование текста статьи (45%).

Ксения Геннадьевна АРИНУШКИНА. Помощь в написании математического аппарата, написание и редактирование текста статьи (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Aleksandr S. ADADUROV. Academic advising, peer review, description of the general idea, terms of reference (35%).

Igor Yu. SAVELEV. System implementation management, adjustment of results considering the rolling stock operations (10%).

Michael A. CHEPULIS. Mathematical description, programme coding for signal processing, article writing and editing (45%).

Kseniya G. ARINUSHKINA. Assistance in mathematical modelling, article writing and editing (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023, рецензия от первого рецензента получена 18.05.2023, рецензия от второго рецензента получена 25.05.2023, рецензия от третьего рецензента получена 26.05.2023, принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 13.04.2023, first review received 18.05.2023, second review received 25.05.2023, third review received 26.05.2023, accepted for publication 11.08.2023.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

Рожицкий, Дмитрий Борисович. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов / Д. Б. Рожицкий. — Москва : РАС, 2022. — 324 с.

Книга содержит необходимые сведения о структуре энергетики железнодорожного транспорта с учетом ее разделения на тяговую и нетяговую компоненты. Показаны доли этих составляющих. Рассмотрены базовые положения о формировании топливно-энергетических балансов и основы нормирования ресурсов применительно к нетяговой энергетике.

Приведены общие положения, методики и примеры расчета нормирования потребления электрической энергии на нетяговые нужды, котельно-печного топлива для котельных и теплоты для стационарных потребителей, включая потребности в ресурсах на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и различные теплотехнологии, основных

видов моторного топлива, применяемого как в автотранспорте, так и для обеспечения работы специализированной техники, осуществляющей работы по прокладке и ремонту железнодорожных путей, а также нормирование водопотребления и определение объемов водоотведения для железнодорожных потребителей.

Издание адресовано в первую очередь инженерам-энергетикам, инженерам по водоснабжению, занимающимся вопросами в области нормирования потребления топливно-энергетических и водных ресурсов, а также вопросами эффективного их использования на нетяговые нужды железнодорожного транспорта. Может быть использовано специалистами других отраслей при решении аналогичных задач, а также научными работниками и студентами высших учебных заведений соответствующих специальностей.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 621.365.5

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>

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



Особенности использования индукционного нагрева цилиндрических деталей, сопряженных с осью

В. И. Дудин✉, С. А. Лелехов, А. Н. Фещуков

Научно-производственная компания «ТомИндуктор»,
Москва, Томск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящей статье предметом изучения является температура разъединения цилиндрической детали от оси и ее зависимость от величины натяга и мощности индукционного нагрева на основе результатов расчетно-теоретического и экспериментального исследования данного вопроса.

Материалы и методы. С помощью расчетов определена температура внешней поверхности цилиндрической детали, при которой натяг принимает нулевое значение и деталь снимается без усилия. Авторами численно решены уравнения теплопроводности и деформации и определены указанные значения температуры разъединения. Кроме того, рассчитан температурный профиль по сечению цилиндрической детали.

Результаты. Выявлена зависимость температуры разъединения цилиндрической детали — внутреннего кольца подшипника от мощности индукционного нагревателя. Учтены зависимости коэффициента температуропроводности от температуры. Рассмотрены особенности посадки цилиндрических деталей на оси и валы.

Обсуждение и заключение. Показано, что зависимость температуры разъединения цилиндрической детали — внутреннего кольца подшипника от мощности имеет две области: для относительно малых значений (до 5–6 кВт) температура разъединения практически постоянна, а для более высоких значений, более 6 кВт, температура разъединения пропорциональна мощности. При этом необходимо, чтобы в конструкции индукционных нагревателей была предусмотрена возможность контроля мощности индукционного нагрева и времени нагрева. Это позволит на техническом уровне запретить выполнение операций с выходом параметров за пределы регламента. Результаты работы могут быть применены к широкому кругу сопряженных с осью деталей, например для бандажей станов холодного волочения труб, бандажей центров колесных пар локомотивов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: буксовый подшипник, индукционный нагрев, цилиндрические детали, натяг, температура разъединения, температурный профиль, температуропроводность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дудин В. И., Лелехов С. А., Фещуков А. Н. Особенности использования индукционного нагрева цилиндрических деталей, сопряженных с осью // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 257–264. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>.

✉ vladimir.dudin@gmail.com (В. И. Дудин)

© Дудин В. И., Лелехов С. А., Фещуков А. Н., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.365.5

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>

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



Features of induction heating of cylindrical parts conjugated with an axis

Vladimir I. Dudin✉, Sergey A. Lelekhov, Alexey N. Feshchukov

TomInduktor Research and Production Company,
Moscow, Tomsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article examines the temperature of separation of a cylindrical part from the axis and its dependence on the interference and induction heating power based on theoretical calculations and experiments.

Materials and methods. The calculations show the temperature of the outer surface of a cylindrical part, where the interference vanishes and the part comes off without force. The authors numerically solved the heat conduction and deformation equations and determined these separation temperatures. The researchers also calculated the temperature profile over the cross-section of a cylindrical part.

Results. The authors identified the dependence of the separation temperature of a cylindrical part (the inner ring of a bearing) on the power of the induction heater. The article considers the dependence of the thermal diffusivity coefficient on temperature and examined the features of fitting cylindrical parts on axes and shafts.

Discussion and conclusion. The research shows that the dependence of the separation temperature of a cylindrical part (the inner ring of a bearing) on power has two regions: the separation temperature is almost constant for relatively small values (up to 5–6 kW); and the separation temperature is proportional to the power for higher values, above 6 kW. In this case, the induction heater requires a controller for induction heating power and heating time. This would technically prohibit operations with parameters outside the test procedure. The research results are applicable to a wide range of axis associated parts, for example, for bands of cold pipe drawing mills, bands for the centres of locomotive wheel pairs.

KEYWORDS: journal bearing, induction heating, cylindrical parts, interference fit, separation temperature, temperature profile, thermal diffusivity

FOR CITATION: Dudin V. I., Lelekhov S. A., Feshukov A. N. Features of induction heating of cylindrical parts conjugated with an axis. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):257-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-257-264>.

✉ vladimir.dudin@gmail.com (V. I. Dudin)

© Dudin V. I., Lelekhov S. A., Feshukov A. N., 2023

Введение. Техническое использование индукционного нагрева началось еще в довоенные годы и связано с фамилией В. П. Вологодина [1]. Наиболее полное отражение технических возможностей индукционного нагрева представлено в работе М. Г. Лозинского [2], который подвел итог многолетним работам по использованию индукционного нагрева. Надо отметить, что основные направления в использовании индукционного нагрева касались решения проблем поверхностной заковки материалов, готовых изделий, а также задач, связанных с конструированием индукционных нагревателей и индукторов [3–5]. В середине 50-х гг. прошлого столетия силами Проектно-конструкторского бюро Главного управления локомотивного хозяйства Министерства путей сообщения СССР (ПКБ ЦТ) были внедрены индукционные нагреватели серии «ПР» для широкого использования при съеме различных цилиндрических деталей с осей и валов. Поскольку данные нагреватели работали на промышленной частоте, то для «подачи» переменного электромагнитного поля для нагрева нужной детали широко использовали промежуточные намагниченные кольца. Указанные нагреватели в системе ОАО «РЖД» в начале 2000-х гг. были полностью вытеснены высокочастотными индукционными нагревателями. Было ясно, что в силу воздействия замкнутых вихревых токов приповерхностный слой нагревается [6, с. 291–293] и, расширяясь, «тянет» за собой всю деталь. Конкретные параметры расширения и деформации деталей при нагреве выявлялись опытным путем. Ориентировочные данные о мощности закладывались в конструкции высокочастотных нагревателей, разумеется, с запасом. В результате конструкция современных нагревателей слабо связана с физическими процессами, протекающими в нагреваемой детали. Эту ситуацию можно сравнить с тем, как в начале XX в. конструкция двигателя слабо зависела от скорости и пробега автомобиля, связи скорости и радиусов поворота и т. д. Работ по индукционному нагреву существует достаточно много, но нет ни одной, в которой была бы исследована связь процессов, протекающих в теле нагреваемой детали, с мощностью нагрева, натягом, временем нагрева и т. д. Цель настоящей работы — исследовать процессы, протекающие при индукционном нагреве в металле, и определить, как они связаны с внешними параметрами, а именно: мощностью нагрева, натягом между деталью и осью, временем нагрева, частотой электромагнитного поля.

Материалы и методы. Расчеты были выполнены численными методами на основе простой модели: цилиндр, сопряженный натягом величиной d с осью. Внешний радиус цилиндра R_0 , внутренний r_0 , высота h . Электромагнитное поле частоты ω создает однослойный

индуктор, витки которого расположены вдоль высоты. Расчетная схема представлена на рис. 1 [7].

Совместное решение уравнений теплопроводности и смещений [8, с. 50; 9] имеет вид

$$\frac{dT(r,t)}{dt} = (\lambda / c\gamma) \left(\frac{d^2 T(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{dT(r,t)}{dr} \right) + Q(r,t) \right); \quad (1)$$

$$\frac{d^2 u(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{du(r,t)}{dr} \right) - u/r = (\mu + 1) \alpha \left(\frac{dT(r,t)}{dr} \right), \quad (2)$$

где $T(r,t)$ — профиль температуры по сечению кольца; $u(r,t)$ — соответствующее распределение смещений; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c — удельная теплоемкость, Дж/кг·К; γ — плотность материала кольца, кг/м³; $Q(r,t)$ — тепловыделение от внутреннего источника, связанного с индукционными токами; μ — коэффициент Пуассона; α — температурный коэффициент расширения, 1/К. При численном решении уравнений (1), (2) использовали следующие приближения.

1. Перенос тепла вдоль оси считали не существенным для результатов, т. е. тепловое излучение в окружающую среду не учитывали. В этих приближениях можно было использовать одномерную геометрию, т. е. температура и смещения зависели от одной компоненты — радиуса r .

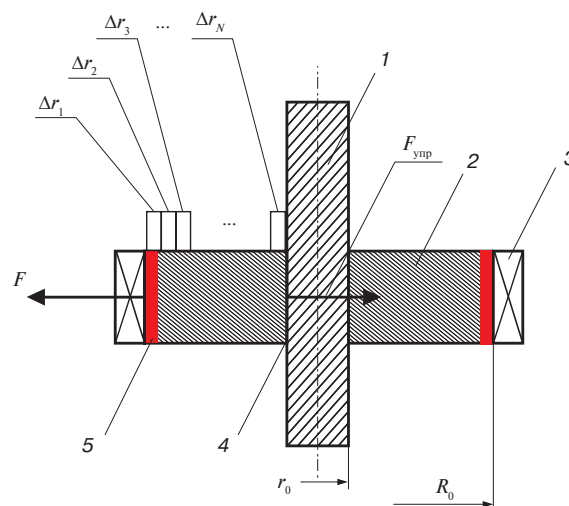


Рис. 1. Расчетная схема для определения процессов, происходящих в нагреваемой детали: 1 — ось; 2 — кольцо; 3 — индуктор; 4 — контакт сопрягаемых тел и температурное сопротивление контакта TRC; 5 — скин-слой; $\Delta r_1 \dots \Delta r_N$ — условные кольцевые слои; $F_{\text{упр}}$ — сила упругости

Fig. 1. Calculation scheme for determining the processes in the heated part: 1 — axis; 2 — ring; 3 — inductor; 4 — contact of mating bodies and temperature resistance of TRC contact; 5 — skin layer; $\Delta r_1 \dots \Delta r_N$ — conventional ring layers; $F_{\text{упр}}$ — elastic force

2. Все указанные характеристики материала при расчетах зависели от температуры, равно как и магнитная проницаемость — от индукции магнитного поля. Справочные данные вносились в приложения программы компьютерных расчетов. Данные о значениях констант и их температурной зависимости от индукции магнитного поля брали из общедоступных источников [2, 10].

3. Использовалось приближение Штейнметца [11], которое заключается в том, что тепловыделения вследствие протекания индукционных токов равны тем, которые вызывались бы постоянным током с амплитудой $I_0 = j_0 sh$, текущим в скин-слое. Здесь j_0 — плотность индукционного тока при $r = R_0$, s — величина (глубина) скин-слоя, h — высота кольца (цилиндра). Это дает возможность определить источник тепловыделений $Q(r, t)$, что упрощает процедуру численного интегрирования уравнений теплопроводности и смещений. Кроме того, этот подход определяет структуру разбиений сечения на N отрезков для численного решения, причем $(R_0 - r_0) / N$ больше величины скин-слоя. Величина скин-слоя рассмотренных сталеи в диапазоне электромагнитных частот 3–10 кГц изменяется в пределах 0,36–0,66 мм. Так, для кольца толщиной 14 мм при разбиении получали 10 слоев. Начальное условие для всех слоев $T_i = T_0 = 20^\circ\text{C}$ (293 К).

4. В приграничном слое, где соприкасаются кольцо и ось, учитывали тепловое сопротивление контакта (коэффициент TRC), связанное с натягом.

Определяли температуру внешней поверхности кольца, при которой натяг принимал нулевое значение. Эту температуру называли температурой разъединения T_p . Помимо теоретического интереса следует отметить, что практически эту температуру легко контролировать опытным путем. Проверка модели расчета [7] показала, что она дает обоснованные ответы на вопросы: как время съема (здесь и далее — это время от начала нагрева до момента разъединения кольца и оси) зависит от мощности P индукционного нагрева; как время съема зависит от тока индуктора, а значит, от мощности индукционного нагрева; как изменяется во время нагрева контактное давление между цилиндром и осью; как изменяется температура внутренней поверхности цилиндра и т. д.

Следует отметить, что в работе представлены в основном результаты расчетно-теоретического исследования. Связано это с тем, что в настоящее время не выпускаются индукционные нагреватели с возможностью регистрации мощности, поэтому для такой регистрации необходимо дополнительное оборудование. Также напомним, что нами использованы общедоступные данные по значениям материальных показателей [2, 10].

Ранее было отмечено, что использование индукционного нагрева имеет широкое распространение.

В этой связи следует отметить работу [12], где исследуется вопрос о нагреве индукционными методами стрелочных переводов в зимний период. Работа стрелок непосредственно связана с безопасностью движения транспортных средств на железных дорогах. Не менее важным является состояние внутренних колец подшипников ступиц колесных пар и опорных узлов локомотивов и вагонов, которые снимаются для обследования и контроля их состояния. Съём и последующую посадку внутренних колец подшипников в железнодорожной отрасли России проводят посредством индукционных нагревателей. Представленные материалы напрямую связаны с этими операциями.

Результаты исследования. В качестве предмета расчетов было взято исследование зависимости температуры разъединения кольца и оси от мощности индукционного нагрева $T_p(P)$. Эта зависимость определяется распределением температуры по сечению кольца, т. е. физическими процессами, происходящими в кольце. Мощность тепловыделения в кольце также зависит от частоты переменного тока индуктора ω , т. е. температура разъединения может зависеть от частоты. Изменять мощность индукционного нагрева можно с помощью изменения тока индуктора, однако в настоящее время не существует высокоточных индукционных нагревателей, в которых можно произвольно менять частоту переменного тока индуктора.

Значительный практический интерес имеется к определению зависимости мощности индукционного нагрева, при которой кольцо снимается без натяга ($d = 0$), от величины натяга.

Следует также отметить следующее обстоятельство. Работа A , совершаемая против упругой силы $F_{\text{упр}}$ при снятии натяга величиной d , определяется из уравнения

$$A = Pt = \text{const}, \quad (3),$$

где t — время нагрева для данной величины натяга. Время нагрева для данного натяга обратно пропорционально мощности [6].

Формальный параметр T_p — температура внешней поверхности кольца, при которой натяг $d = 0$, и зависимость мощности индукционного нагрева от натяга $P(d)$ определяются физическими процессами, происходящими в кольце при нагреве. Следовательно, мы рассчитывали зависимость температуры в сечении кольца от радиуса, т. е. температурный профиль в момент достижения состояния с $d = 0$.

На рис. 2 представлены зависимости температуры T_p кольца №42726 (буксовый подшипник вагона электропоезда, диаметр шейки оси колесной пары 130 мм) от мощности индукционного нагрева для величин натяга $d = 30, 40, 50$ мкм, $\omega = 5$ кГц. Характерной чертой всех кривых является наличие области, где температура разъединения кольца с осью слабо зависит

от мощности нагрева, и области, где температура разъединения пропорциональна мощности нагрева. Очевидно, что температура разъединения носит пороговый характер, т. е. при значениях мощности меньше пороговой разъединения деталей не происходит. Стоит отметить, что область независимости (или слабой зависимости) температуры разъединения деталей от мощности индукционного нагрева с ростом величины натяга уменьшается, а для натяга 50 мкм, скорее всего, этой области не существует.

На рис. 3 представлен график зависимости мощности от величины натяга, при которой происходит разъединение деталей. Этот график построен по данным, представленным на рис. 2. Данные по координате мощности являются пороговыми величинами, при которых происходит разъединение деталей. Расчетные точки графика (кривая 1) зависимости мощности нагрева от величины натяга описываются параболической кривой. Для втулки уплотнения тягового электродвигателя 1ДТ.003.3 была получена зависимость из расчетов, отображенных кривой 2. Для величины натяга 50 мкм квадратичная зависимость не выполняется. Можно констатировать, что для относительно малых мощностей индукционного нагрева, соотносящихся с малыми величинам натяга, имеет место параболическая зависимость температуры разъединения от мощности индукционного нагрева. Для высоких значений мощности и значений натяга указанная зависимость не выполняется.

В расчетах для зависимостей на рис. 4 мощность изменяли с помощью тока индуктора. Но мощность, выделяемая в кольце, при индукционном нагреве зависит также от частоты этого тока [13, с. 34], $P \approx \sqrt{\omega}$. Была рассчитана зависимость температуры разъединения внутреннего кольца буксового подшипника № 42736 и шейки оси при $d = 30$ мкм, $\omega = 10$ кГц. Видно, что температура разъединения пропорциональна мощности индукционного нагрева, а области независимости температуры разъединения от мощности не существует.

Чтобы объяснить указанные закономерности, рассчитаны зависимости распределения температуры по сечению кольца для двух выше обозначенных областей — со слабой и относительно высокой мощностью индукционного нагрева. Первая область соответствует слабой зависимости температуры разъединения от мощности нагрева, вторая — пропорциональной зависимости температуры разъединения от мощности нагрева.

На рис. 5 представлен график распределения температуры по сечению кольца № 42726 в момент его разъединения с осью: линия T1 соответствует области слабой зависимости температуры разъединения от мощности, а линия T2 относится к области, в которой температура разъединения растет с ростом

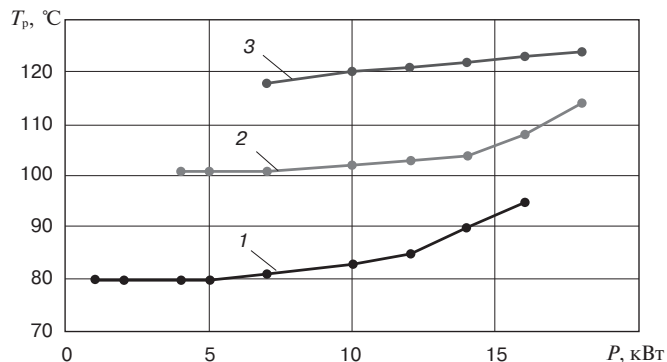


Рис. 2. Зависимость температуры разъединения кольца № 42726 от мощности индукционного нагрева для величины натяга: 1 — 30 мкм; 2 — 40 мкм; 3 — 50 мкм. Частота электромагнитного поля $\omega = 5$ кГц

Fig. 2. Dependence of the temperature of separation the ring No. 42726 on the power of induction heating for the amount of interference: 1 — 30 μm ; 2 — 40 μm ; 3 — 50 μm . Electromagnetic field frequency $\omega = 5$ kHz

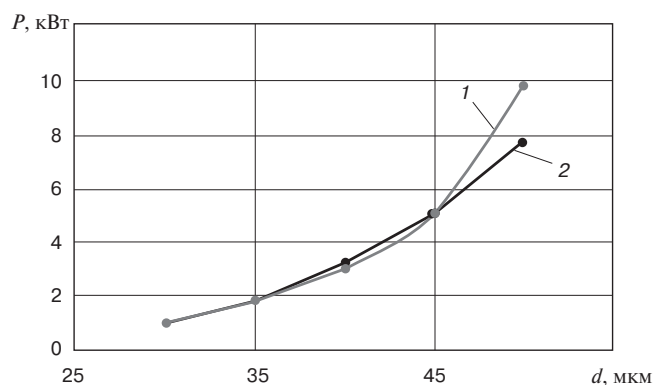


Рис. 3. Зависимость мощности разъединения кольца и оси от величины натяга:

1 — расчет по квадратичной зависимости, $\omega = 5$ кГц; 2 — по данным рис. 2 (кривая 2)

Fig. 3. Dependence of the separation power of the ring and the axis on the interference: 1 — calculation using quadratic dependence, $\omega = 5$ kHz; 2 — based on fig. 2 data (curve 2)

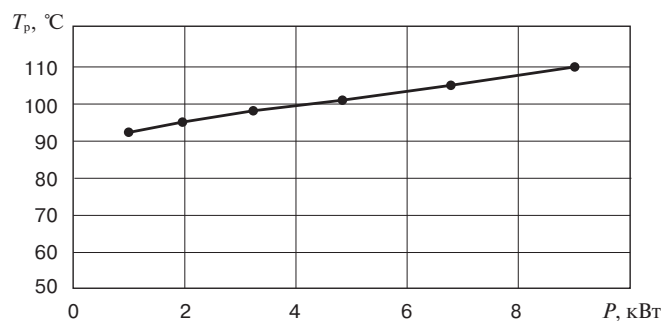


Рис. 4. Зависимость $T_p(P)$ для внутреннего кольца подшипника № 42736, натяг 30 мкм, $\omega = 10$ кГц

Fig. 4. Dependence $T_p(P)$ for the inner ring of the bearing No. 42736, interference 30 μm , $\omega = 10$ kHz

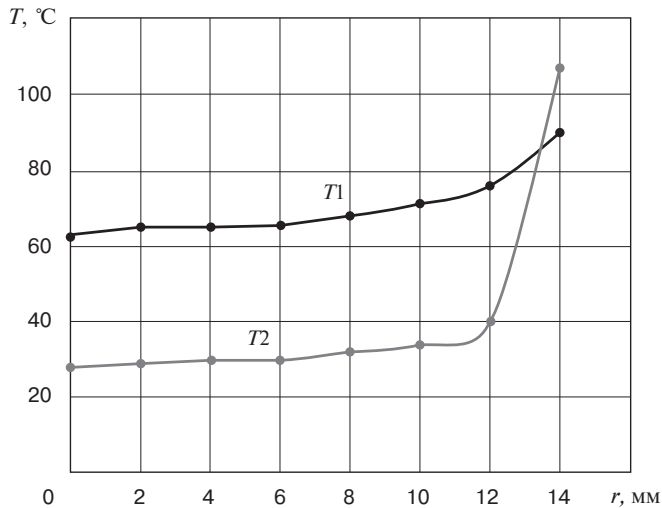


Рис. 5. Распределение температуры по сечению кольца № 42726, $d = 40$ мкм:

$T1$ — линия для диапазона температур, в котором температура разъединения кольца и оси не зависит от мощности (рассчитано для мощности 2 кВт); $T2$ — линия для диапазона температур разъединения кольца и оси, в котором температура разъединения пропорциональна мощности (рассчитано для мощности 10 кВт)

Fig. 5. Temperature distribution over the cross section of the ring No. 42726, $d = 40$ μm :

$T1$ — line for a temperature range in which the ring and axis separation temperature does not depend on power (calculated for a power of 2 kW); $T2$ — line for a temperature range of the ring and axis separation in which the separation temperature is proportional to power (calculated for a power of 10 kW).

мощности. В данном случае речь идет о кольце с натягом 40 мкм, $\omega = 5$ кГц.

Наблюдается отличие распределения температурных зависимостей по сечению кольца. Можно предположить, что для $T1$ кольцо расширяется постепенно как целое, и такой сьем можно определить как термомеханический. Авторы неоднократно наблюдали, как в некоторых случаях, когда кольцо не снималось, газосварщик устанавливал мощную длинную струю ацетиленового пламени и плавными движениями грел по кругу кольцо, после этого кольцо снималось без усилий. В области, где температура T_p зависит от мощности, ось при снятии кольца нагревается слабо: в момент разъединения ось имеет температуру 27 °С, а начальная температура оси — 20 °С.

Такое поведение $T(r)$, скорее всего, связано с зависимостью параметра температуропроводности $a = \lambda / (c\gamma)$ от температуры, этот параметр определен уравнением (1). Также следует иметь в виду зависимость от температуры модуля Юнга E . В наших

расчетах принципиально учитывались температурные зависимости указанных выше параметров.

Известно [14, 15], что оба параметра уменьшаются с ростом температуры. Для сталей эта зависимость начинает проявляться при температуре 80 °С и выше. При более низких значениях указанные параметры практически не зависят от температуры, что ведет к независимости температуры разъединения от мощности. Когда температура приближается к 100 °С, уменьшение параметра a приводит к затруднению изменения температуры по сечению кольца, в то время как температура на поверхности растет. При сравнении температурных профилей по сечению кольца от 0 до 14 мм (рис. 5) видно, что для $T1$ профиль сосредоточен в диапазоне 63–66 °С, для $T2$ — в диапазоне 28–32 °С, начальная температура при расчетах 20 °С. Можно сказать, что для кольца с профилем $T2$ температура во внутренней части кольца «замораживается», т. е. на внешней поверхности кольца она возрастает быстрее: скорость роста температуры более чем в четыре раза превышает скорость изменения температуры во внутреннем объеме кольца. Рост температуры в приповерхностном слое способствует быстрому «растягиванию» приповерхностного слоя кольца, что приводит к снятию натяга ($d = 0$).

Обсуждение. Для объяснения параболической зависимости мощности, при которой натяг зануляется ($d = 0$), от величины натяга используем закон Гука для оценочных вычислений [16, с. 34]. Для этой области, где термофизические характеристики почти не меняются с температурой, указанный закон можно применить. При относительно медленном нагревании кольцо нагревается и расширяется, происходит работа против упругой силы $F = kr$, где k — коэффициент упругости, r — координата по радиусу кольца. Работа A по снятию натяга определяется интегралом

$$A = \int_0^d k r dr. \quad (4)$$

Интеграл определяем в пределах от 0 до d , т. е. до состояния, когда натяг «снимается». После интегрирования получим

$$A = k d^2 / 2. \quad (5)$$

Теперь из (3) и (5) вытекает $P \sim d^2$, что подтверждают данные рис. 3. Исключение касается относительно больших значений натяга, где работает другой механизм разъединения кольца с осью. Это требует дополнительных исследований.

¹ Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту узлов с подшипниками качения локомотивов и моторвагонного подвижного состава [Электронный ресурс]: утв. МПС РФ от 11.06.1995 № ЦТ-330. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200080497> (дата обращения: 10.01.2023); Электрические машины электропоездов. Общее руководство по ремонту. 104.03.00672-2009 КО: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2009 № 2731р. Екатеринбург: УралЮрИздат, 2013. 184 с.

Данные на рис. 2 позволяют сделать вывод, который имеет значение для технических приложений индукционного нагрева, применяемого в разных отраслях машиностроения. В значительной области мощностей можно выбрать такую величину, при которой разъединяются кольца с разным натягом. Поскольку для внутренних колец подшипников, используемых в подвижном составе железных дорог, существует значительный разброс в величинах натягов¹, возможность снятия колец с разбросом величин натягов при одном и том же значении мощности представляет значительный производственный интерес. При этом надо отметить, что проведенные вычисления для внутренних колец подшипников показывают, что это возможно: предел температуры разъединения кольца с осью, установленный нормативами ОАО «РЖД» (120 °С), не превышен в значительном диапазоне мощности (рис. 2). Для таких температурных профилей вполне можно ввести понятие средней температуры [17, с. 51], которое используют при выборе температуры нагрева для получения определенной величины натяга. Указанное обстоятельство позволяет говорить о необходимости создания такого типа индукционных нагревателей, в которых следует учитывать зависимость мощности съема кольца (и ему подобных деталей) от величины натяга. Возможность работы с одним значением мощности нагрева, изменяя только время нагрева, позволяет ввести в память устройства предельный режим нагрева для данной детали. Выход за рамки этого режима, т. е. нарушение регламента операции, может быть занесено в память нагревателя как ЧП.

Расчетно-теоретическая часть работы проведена на простой модели кольца, сопряженного натягом с осью. Полученные результаты будут полезны для работы с деталями, сопряженными с осью, например для бандажей станов холодного волочения труб, бандажей центров колесных пар локомотивов, ходовых колец транспортных средств, в том числе эскалаторов метрополитенов. По всем указанным деталям у специалистов НПК «Томские индукционные системы» есть опыт внедрения индукционных нагревателей.

Заключение. Результаты представленной здесь работы описывают физические процессы, происходящие в цилиндрической детали, сопряженной натягом с осью, при индукционном нагреве. Показано, что существуют две области мощности индукционного нагрева, когда температура внешней поверхности кольца достигает уровня, при котором кольцо снимается без натяга. Для относительно малых мощностей (до 5–6 кВт) температура разъединения практически не зависит от мощности; в этой области мощность пропорциональна квадрату величины натяга. При высоких значениях мощности (более 6 кВт) температура разъединения пропорциональна мощности.

При увеличении частоты электромагнитного поля температура разъединения деталей начинает зависеть от мощности и пропорциональна ей, а области независимости температуры разъединения деталей от мощности, вероятно, не существует.

Важным для технологического аспекта машиностроительного производства при проектировании и производстве высокочастотных индукционных нагревателей является вывод о необходимости учета значительной зависимости температуры от величины натяга сопряженных деталей, при которой осуществляется съем детали. Вместе с тем необходимо иметь возможность плавно менять и регистрировать развиваемую индуктором мощность и время нагрева.

Благодарности: авторы выражают благодарность Н. В. Скугаревской за полезную критику работы и П. В. Дудину за большую помощь в процессе подготовки и оформления статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to N. V. Skugarevskaya for useful criticism and P. V. Dudin for great assistance in preparing the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Вологдин В. П. Поверхностная индукционная закалка. М.: Оборонгиз, 1947. 291 с. [Vologdin V. P. *Surface Induction Hardening*. Moscow: Oborongiz; 1947. 291 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rkvvqs>.
2. Лозинский М. Г. Промышленное применение индукционного нагрева. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 471 с. [Lozinskiy M. G. *Commercial Use of Induction Heating*. Moscow: Izd. Akad. Nauk USSR; 1958. 471 p. (In Russ.)].
3. Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева / В. Б. Демидович [и др.] // Индукционный нагрев. 2012. № 3 (21). С. 26–28 [Demidovich V. B., Maslikov P. A., Grigor'ev E. A., Olenin V. A. Innovative technologies for processing titanium alloys using induction heating. *Induction heating*. 2012;(3):26-28. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pcbutr>.
4. Немков В. С. Достижения в технологии изготовления закалочных индукторов // Индукционный нагрев. 2008. № 1 (3). С. 9–11 [Nemkov V. S. Advancements in induction heating tooling technology. *Induction heating*. 2008;(1):9-11. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/kxnsht>.
5. Демидович В. Б. О точности вычисления температурных полей при индукционном нагреве // Индукционный нагрев. 2013. № 1 (23). С. 46 [Demidovich V. B. About the accurate computation of temperature fields at induction heating. *Induction heating*. 2013;(1):46. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pqxqsij>.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. М.: Наука, 1982. 621 с. [Landau L. D., Lifshits E. M. *Theoretical Physics. Vol. 8 Electrodynamics of Continuous Media*. 2nd ed. Moscow: Nauka; 1982. 621 p. (In Russ.)].

7. Деформация цилиндрических деталей, сопряженных с осью, при индукционном нагреве / В. И. Дудин [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 73–77 [Dudin V. I., Lelekhov S. A., Sushko A. V., Feshchukov A. N. Deformation of cylindrical parts mated with an axis during induction heating. *Russian Engineering Research*. 2021;(12):73–77 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-12-73-77>.

8. Владимиров В. С. Уравнения математической физики: учеб. для физ.-техн. спец. вузов. 5-е изд., доп. М.: Наука, 1988. 512 с. [Vladimirov V. S. *Equations of Mathematical Physics*. 5th ed. Moscow: Nauka; 1988. 512 p. (In Russ.)].

9. Князева А. Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. 356 с. [Knyazeva A. G. *Thermophysical foundations of modern high-temperature technologies: a textbook*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing; 2009. 356 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/qjydw>.

10. Физические величины: справ. / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Grigor'ev I. S., Meilikhov E. Z. *Handbook of Physical Values*. Moscow: Energoatomizdat; 1991. 1232 p. (In Russ.)].

11. Steinmetz C. P. *Theory and calculation of transient electric phenomena and oscillations*. N.Y.: McGraw Publishing Company; 1909. 593 p.

12. Ермоленко Д. В., Юфев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 1. С. 48–53 [Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A. Test results of the resonant single-wire power transmission system for induction heating of the switch rail. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(1):48–53. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-48-53>.

13. Котельников И. А., Черкасский В. С. Скин-эффект в задачах: электронный учеб. Новосибирск, 2014. 82 с. [Kotel'nikov I. A., Cherkasskiy V. S. *Skin effect in problems: electronic textbook*. Novosibirsk; 2014. 82 p. (In Russ.)].

14. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с. [Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V., Astakhov Yu. I., Gerasimov V. I., Golen'shina L. G., et al. *Database of Steels and Alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 2003. 784 p. (In Russ.)].

15. Коэффициент температуропроводности стали 16X12B2FTaP в широком интервале температур / А. Ш. Агажанов [и др.] // Вестник НГУ. Серия Физика. 2013. Т. 8, № 3. С. 163–167 [Agazhanov A. Sh., Savchenko I. V., Samoshkin D. A., Stankus S. V., Dutova O. S. Thermal diffusivity of 16Kh12V2FTaR steel in a wide temperature range. *Vestnik NSU. Series: Physics*. 2013;8(3):163–167 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2013-8-3-163-167>.

16. Феодосьев В. И. Соппротивление материалов: учеб. для вузов. 18-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 542 с. [Feodos'ev V. I. *Strength of Materials. College Textbook*. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University; 2021. 542 p. (In Russ.)].

17. Дунаев П. Ф., Леанков О. П., Варламова Л. П. Допуски и посадки. Обоснование выбора. М.: Высшая школа, 1984. 112 с. [Dunaev P. F., Leankov O. P., Varlamova L. P. *Tolerances and fittings. Choice justification*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1984. 112 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович ДУДИН, канд. техн. наук, советник директора по науке, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634012, г. Томск, пр. Кирова, д. 58, стр. 7, офис 1010), AuthorID: 1187696, <https://orcid.org/0000-0002-6271-6413>

Сергей Андреевич ЛЕЛЕХОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634012, г. Томск, пр. Кирова, д. 58, стр. 7, офис 1010), AuthorID: 609053, <https://orcid.org/0000-0002-8738-0880>

Алексей Николаевич ФЕЩУКОВ, директор, Научно-производственная компания «ТомИндуктор» (634021, г. Томск, ул. Шевченко, д. 45/2)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. DUDIN, Cand. of Sci. (Eng.), Director's Advisor for Science, TomInduktor Research and Production Company (634012, Tomsk, 58/7, Office 1010, Kirova Ave.), Author ID: 1187696, <https://orcid.org/0000-0002-6271-6413>

Sergey A. LELEKHOV, Cand. of Sci. (Eng.), Leading Researcher, TomInduktor Research and Production Company (634012, Tomsk, 58/7, Office 1010, Kirova Ave.), Author ID: 609053, <https://orcid.org/0000-0002-8738-0880>

Alexey N. FESHCHUKOV, Director, TomInduktor Research and Production Company (634021, Tomsk, 45/2, Shevchenko St.)

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович ДУДИН. Предложение и обоснование концепции исследования как в теоретическом плане, так и в области экспериментальных работ, подготовка материала для публикации, написание и редактирование статьи (40%).

Сергей Андреевич ЛЕЛЕХОВ. Разработка и настройка программы компьютерных расчетов, участие в отборе материала для публикации (40%).

Алексей Николаевич ФЕЩУКОВ. Обеспечение подготовки экспериментального материала для публикации (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. DUDIN. Proposal and justification of the research concept in theoretical and experimental terms, preparation of contents for publication, article writing and editing (40%).

Sergey A. LELEKHOV. Development and configuration of a computer software, participation in the selection of contents for publication (40%).

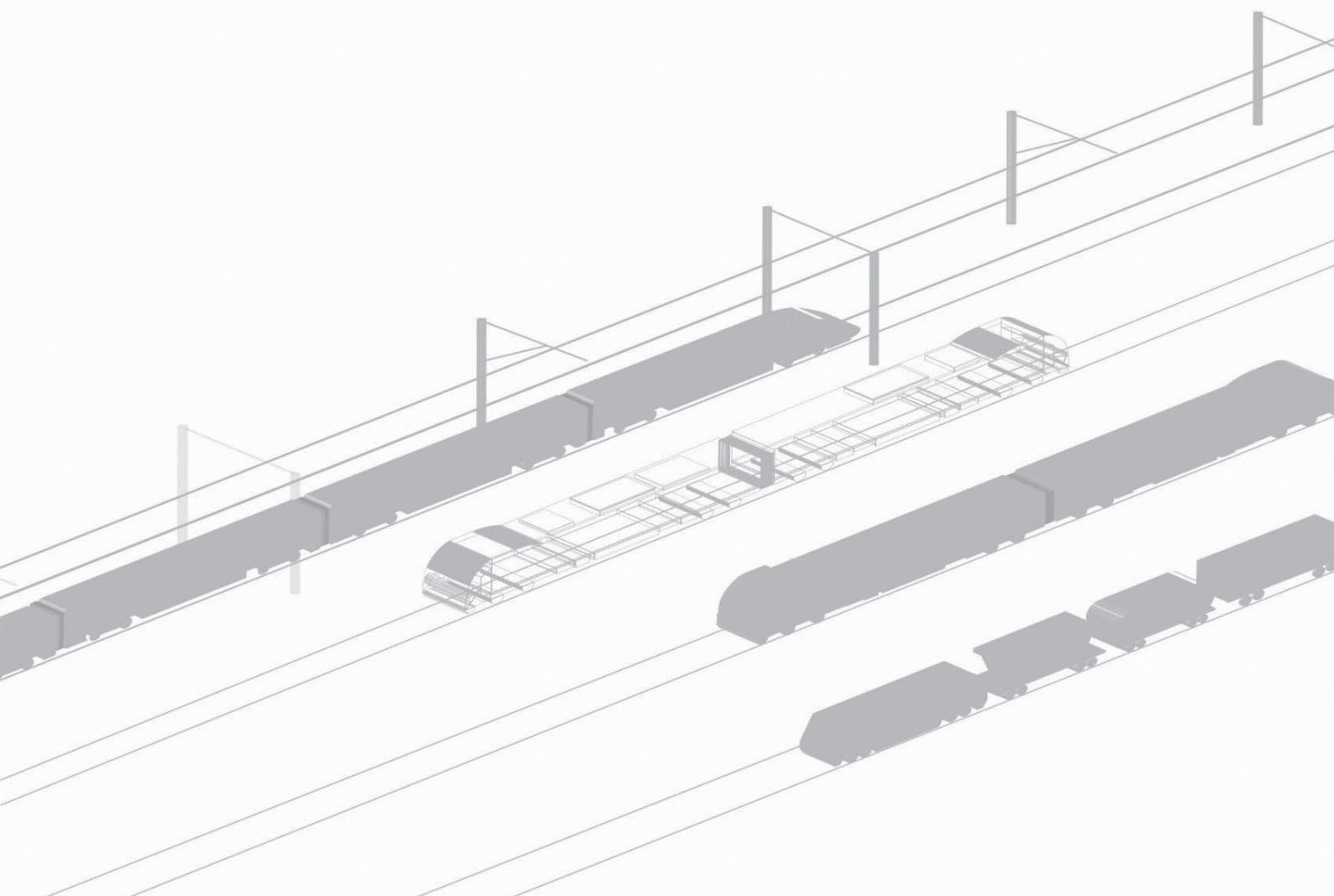
Alexey N. FESHCHUKOV. Ensuring the preparation of experimental materials for publication (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 07.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 14.02.2023, рецензия от второго рецензента получена 10.05.2023, принята к публикации 19.07.2023.
The article was submitted 07.02.2023, first review received 14.02.2023, second review received 10.05.2023, accepted for publication 19.07.2023.

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ECONOMICS AND MANAGEMENT





ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальная статья

УДК 628.477

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-266-273>

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



К вопросу образования и утилизации отходов на объектах железнодорожного транспорта

Л. Б. Хайруллина✉, Н. Л. Мамаева

Тюменский индустриальный университет (ТИУ),
Тюмень, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Совершенствование системы обращения с отходами производства и потребления в подразделениях ОАО «РЖД», переработка и вовлечение их во вторичный оборот является одним из основных направлений стратегии и реализации мероприятий в области экологической безопасности.

Материалы и методы. В работе проведен статистический анализ официальных данных по образованию отходов производства и потребления за период с 2015 по 2021 г., исследована динамика образования отходов по классам опасности и объемам ежегодного захоронения отходов.

Результаты. Статистический анализ показал, что процесс образования отходов производства и потребления на железнодорожном транспорте замедляется, ежегодное количество отходов за последние семь лет хоть и незначительно, но снижается. Доля опасных отходов составляет примерно 25 % от общей массы отходов. Общие объемы захоронения отходов за рассматриваемый период времени имеют тенденцию к снижению, что может быть связано с уменьшением использования высокоопасных товаров, увеличением вводимых в действие установок по безопасной переработке производственных отходов и проведением различных мероприятий, направленных на повышение уровня вовлечения отходов во вторичный оборот.

Обсуждение и заключение. Снижению объемов образования отходов способствует применение новых подходов к обращению с ними: рециклинга изношенных шпал, отработанного масла, лома черных и цветных металлов и других отходов; внедрения электронного документооборота для экономии бумаги и картона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, образование и захоронение отходов, рециклинг, вторичные ресурсы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хайруллина Л. Б., Мамаева Н. Л. К вопросу образования и утилизации отходов на объектах железнодорожного транспорта // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 266–273. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-266-273>.

✉ hairullina.1964@mail.ru (Л. Б. Хайруллина)

© Хайруллина Л. Б., Мамаева Н. Л., 2023



ECONOMICS AND MANAGEMENT

Original article

UDK 628.477

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-266-273>

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



Problem of the waste formation and disposal on the railways

Larisa B. Khairullina✉, Natali L. Mamaeva,

Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Improving the management system of industrial and consumption waste of the Russian Railways, waste processing and recycling are some of the main focuses of the company's environmental strategy.

Materials and methods. The paper statistically analyses official data on the generation of industrial and consumption waste for 2015–2021, examines waste generation trends by hazard classes and volumes of annual waste dumping.

Results. The statistical analysis shows that the process of generation of industrial and consumption waste and the annual amount of waste over the past seven years slightly decreases. The share of hazardous waste is approximately 25% of the total waste mass. This period sees total landfill volumes tend to decrease, likely due to less use of highly hazardous goods, more installations for the safe processing of industrial waste, and measures to increase waste recycling.

Discussion and conclusion. New approaches help decrease waste generation: recycling of worn sleepers, waste oil, ferrous and non-ferrous scrap and other waste; electronic document management to save paper and cardboard.

KEYWORDS: railway transport, waste generation and dumping, recycling, recyclable resources

FOR CITATION: Khairullina L. B., Mamaeva N. L. Problem of the waste formation and disposal on the railways. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):266-273. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-266-273>.

Введение. На сегодняшний день проблема обращения с отходами, которые образуются на различных этапах производственной и коммунальной сферы деятельности, чрезвычайно актуальна, а вопросы экологически безопасной утилизации отходов — предмет исследований как в нашей стране, так и за рубежом [1–4]. Не являются исключением и предприятия железнодорожного транспорта, в процессе хозяйственной деятельности которых образуется порядка 600 наименований отходов, часть из которых специфична [5]. Совершенствование системы обращения с отходами производства и потребления в подразделениях ОАО «РЖД», переработка и вовлечение их во вторичный оборот — одно из основных направлений стратегии¹ и реализации мероприятий в области технологической безопасности².

Твердые отходы железнодорожных предприятий состоят из деревянных шпал, не годных к укладке в путь, — 67%, нефтешламов — 18%, твердых коммунальных отходов — 8%, загрязненных грунтов — 5%, отработанных смазок и масел — 1%, осадков биологических очистных сооружений — 1%³. Как отмечает А.В. Рязанов [5], наибольшее количество отходов приходится на IV–V классы опасности. Отходы I–III классов составляют незначительную часть от общей массы.

Наиболее остро в настоящее время стоит проблема утилизации шпал, которые относятся в основном к III и IV классам опасности для окружающей среды. Ежегодно из 200 млн деревянных шпал примерно 14 млн изнашиваются и требуют замены. Одним из путей решения данной проблемы является применение композитных шпал [6], которые помогают разрешить и важную экологическую проблему утилизации пластмасс в переработке вторичных полимерных отходов. Успешно проведенные испытания показали, что композитные шпалы не подвержены процессам гниения, заплесневения и являются электроизолирующим материалом, срок их эксплуатации с учетом ремонта достигает 50 лет, а также они в 1,5 раза прочнее новых деревянных и почти в три раза легче железобетонных шпал [6]. Система рациональной замены шпал, разработанная американскими компаниями Conrail и Koppers Industries, предусматривает использование

образующегося при сжигании старых шпал пара для обработки древесины и получения электроэнергии [7]. На полигонах Октябрьской, Московской, Горьковской и Свердловской железных дорог внедрены и эксплуатируются комплексы по утилизации железобетонных шпал для последующего получения строительного щебня и очищенного лома арматурной стали⁴.

Ежегодно на предприятиях железнодорожного транспорта образуется свыше 200 тыс. т нефтесодержащих отходов и тяжелых нефтешламов, относящихся к одной из основных и наиболее опасных групп токсичных отходов [6]. Такие отходы, как ртутные лампы и аккумуляторы с электролитом, обладают токсичными свойствами и относятся к I и II классам опасности соответственно.

Таким образом, функционирование железных дорог сопровождается загрязнением окружающей среды не только выбросами и стоками, но и образованием и накоплением отходов [8]. Земельные ресурсы предприятий железнодорожного транспорта, используемые или предназначенные для обеспечения деятельности отрасли, эксплуатации подвижного состава, а также участки, расположенные на полосах отвода железных дорог, подвержены физическому, химическому и бактериальному загрязнению [9]. Так, например, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, из наибольшего числа аварийных ситуаций, связанных с проливом нефти и нефтепродуктов, на железнодорожный транспорт приходится около 29% [10]. Использование в производственных ремонтных подразделениях железнодорожного транспорта смазочных и пропиточных материалов также оказывает негативное влияние на почвенный покров. В связи с этим зарубежные фирмы, такие как Monsanto, DuPont и General Electric, совместно с Департаментом окружающей среды и энергетики США проводят испытания технологии Lasagna по обезвреживанию грунта⁵. Японская фирма «Обаяси» (Obayashi Corporation) разработала электрохимическую технологию очистки грунта территорий демонтированных химических предприятий для введения земель в оборот [11]. Данная технология обеспечивает

¹ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/549eef11ae953dc6e4261b88ed6d14f776df3203 (дата обращения: 20.11.2022).

² Отчет о деятельности ОАО «РЖД» в области устойчивого развития [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386> (дата обращения: 20.11.2022).

³ Рекомендации по ликвидации отходов деятельности железнодорожного транспорта [Электронный ресурс]: утв. совещанием Комиссии ОСЖД по транспортной политике и стратегии развития, Варшава, 14–17 октября 2003 г. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/7134> (дата обращения: 20.11.2022).

⁴ Выбираем зеленое будущее [Электронный ресурс]: годовой отчет — 2021 / ОАО «РЖД». URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/1841503?action=download> (дата обращения: 20.11.2022).

⁵ Schmidt K. Technology: 'Lasagne' gobbles up toxic wastes. *New Scientist*. 19.02.1994 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg14119133-400-technology-lasagne-gobbles-up-toxic-wastes> (дата обращения: 20.11.2022).

высокую степень очистки от токсичных органических веществ до 25 наименований.

Как уже было отмечено, на сегодняшний день проблема утилизации отходов является одной из наиболее актуальных. Решение данной проблемы заключается, в частности, в минимизации их образования. К примеру, внедрение безбумажных технологий, основанных на автоматизированной системе документооборота, — важный шаг в этом направлении. Для решения проблемы утилизации отходов не менее важной задачей является их вовлечение во вторичный оборот.

Так, например, в рамках научно-образовательного центра (НОЦ) Тюменского индустриального университета проводятся научные исследования получения композитных материалов из вторичного полимерного сырья, которые могут использоваться на объектах железнодорожного транспорта. Для решения этой задачи на заводе ООО «Неокомпозит» проведены экспериментальные и промышленные исследования на прочность изготовления малогабаритной продукции из вторичного полимерного сырья с разработанным новым составом пластификатора и получены положительные результаты. Из трудноперерабатываемых полимерных отходов («сечки», содержащей отходы целлюлозы) получены новые составы композитных материалов, идущие на создание новой продукции. Одним из основных компонентов состава композитных материалов являются пластификаторы, которые влияют на физико-механические свойства изделий. Пластификатор способен увеличивать пластичность композиционного материала, что снижает энергопотребление, повышая экономическую эффективность производства [12–15]. Переработка полимерного мусора решает проблемы экологической безопасности и отчасти вопросы импортозамещения в производстве малотоннажной химии. На сегодняшний день эти задачи также актуальны.

В связи с вышеизложенным цель работы — исследование динамики образования отходов производства и потребления от деятельности подразделений железнодорожного транспорта с целью минимизации их образования и вовлечения во вторичный оборот.

Материалы и методы. Для исследования системы обращения с отходами производства и потребления в подразделениях железнодорожного транспорта были использованы отчеты о деятельности ОАО «РЖД»⁶ [16]. Проведен анализ статистических данных образования отходов производства и потребления за период с 2015 по 2021 г. Исследована динамика образования

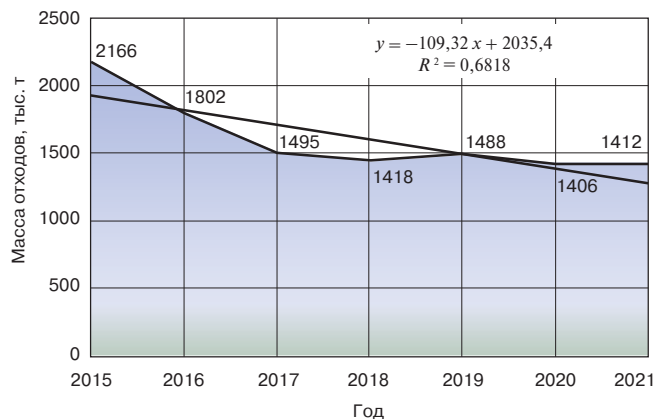


Рис. 1. Объем образования отходов производства и потребления

Fig. 1. Volumes of industrial and consumption waste generation

отходов по классам опасности, объему захоронения отходов. По результатам исследований построены линии тренда с нахождением величины достоверности аппроксимации R^2 с использованием программы Excel.

Результаты исследований. В 2021 г. в ОАО «РЖД» образовалось 1,412 млн т отходов производства и потребления, из которых утилизировано и обезврежено в структурных подразделениях компании лишь 0,066 млн т [16]. Объем образования отходов производства и потребления за 2015–2021 гг. представлен на рис. 1.

Объем образования отходов производства и потребления за последние семь лет незначительно уменьшается, что объясняется повторным вовлечением вторичных отходов в хозяйственный оборот в качестве сырья для изготовления новой продукции. Одной из основных причин существенного уменьшения образования отходов на железнодорожном транспорте в 2020 г. стала пандемия коронавирусной инфекции, в результате которой сократилась перевозка пассажиров и часть персонала подразделений железной дороги была переведена на дистанционную работу. При построении линии тренда и нахождении величины достоверности аппроксимации R^2 было выявлено, что $y = -109,32x + 2035,4$ при $R^2 = 0,6818$.

Отходы железнодорожного транспорта содержат органические соединения, тяжелые металлы, нефтепродукты, токсичные химические вещества, отработавшие люминесцентные лампы, отходы лакокрасочных производств, ветошь и грунт, загрязненные маслами и смазками, с территорий предприятий. К наиболее опасным относятся шламы из очистных сооружений гальванических участков,

⁶ Отчет о деятельности ОАО «РЖД» в области устойчивого развития 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386> (дата обращения: 20.11.2022).

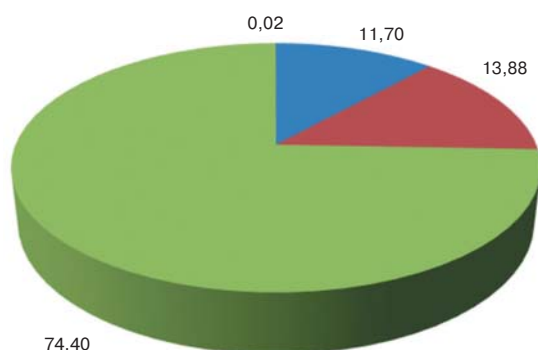


Рис. 2. Процентное соотношение образования отходов I–V классов опасности на железнодорожном транспорте в 2020 г.:

■ I и II классы опасности ■ IV класс опасности
■ III класс опасности ■ V класс опасности

Fig. 2. Percentage of waste generation of Hazard Classes I–V in railway transport in 2020:

■ Hazard Classes I and II ■ Hazard Class IV
■ Hazard Class III ■ Hazard Class V

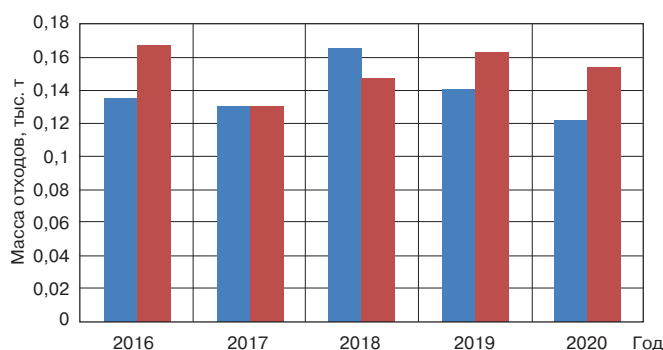


Рис. 3. Динамика образования отходов I и II классов опасности:

■ I класс опасности ■ II класс опасности

Fig. 3. Hazard Class I and II waste generation trends:

■ Hazard Class I ■ Hazard Class II

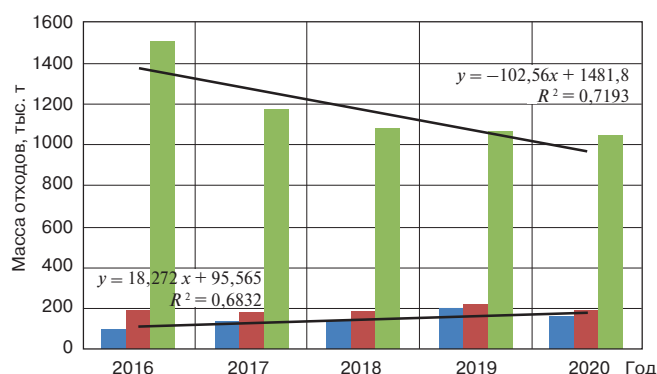


Рис. 4. Динамика образования отходов III–V классов опасности:

■ III класс опасности ■ IV класс опасности ■ V класс опасности

Fig. 4. Hazard Class III–V waste generation trends:

■ Hazard Class III ■ Hazard Class IV ■ Hazard Class V

отходы из химчисток рабочей одежды, плавающие нефтепродукты и нефтешламы.

За последние годы заметно увеличился объем отходов полимерной продукции, которые образуются при технологических процессах железнодорожного транспорта (например, при текущем ремонте тепловозов, электросекций, вагонов, составных частей). Огромное количество полимерного мусора образуется при перевозке пассажиров: пластиковая посуда, тетрапакеты, игрушки, всевозможные бытовые изделия из пластика и полимерного материала.

Соотношение отходов разных классов опасности, образовавшихся на железнодорожном транспорте в 2020 г., представлено на рис. 2.

Согласно диаграмме, в 2020 г. в общей массе отходов преобладали отходы V класса опасности — 74,40 %, которые в основном можно использовать как вторичные материальные ресурсы. На долю отходов III и IV классов опасности приходилось 11,70 и 13,88 % соответственно. На долю отходов I и II классов опасности в 2020 г. приходилось 0,02 %.

На рис. 3 представлена динамика образования отходов I и II классов опасности за период 2016–2020 гг.

При рассмотрении динамики образования отходов на железнодорожном транспорте выявлено, что объем чрезвычайно опасных и высокоопасных отходов за рассматриваемые годы практически остается на постоянном уровне, по отходам III, IV и V классов опасности (рис. 4) наблюдается незначительное увеличение умеренно опасных отходов ($y = 18,272x + 95,565$; $R^2 = 0,6832$) и снижение практически неопасных отходов ($y = -102,56x + 1481,8$; $R^2 = 0,7193$).

Основным решением проблемы обращения с отходами является повышение уровня их переработки

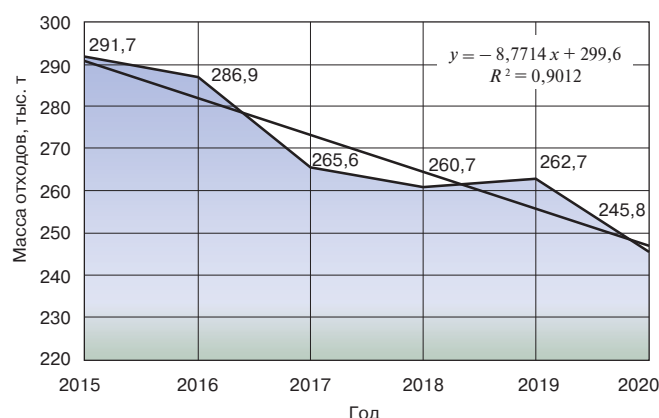


Рис. 5. Динамика объемов захоронения отходов

Fig. 5. Waste dumping trends

⁷ Отчет о деятельности ОАО «РЖД» в области устойчивого развития за 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386> (дата обращения: 20.11.2022).

и превращение отходов во вторичное сырье для изготовления новой продукции. Как отмечается в отчете ОАО «РЖД», примерно 80 % образующихся в компании отходов утилизируется, обезвреживается и вовлекается во вторичный оборот⁷. Реализуется инициатива по отдельному накоплению отходов бумаги, картона, стекла и пластика в офисных зданиях, административно-бытовых помещениях и железнодорожных вокзалах. Помимо этого, из отходов, отправляемых на захоронение, поэтапно исключаются бумага, картон, стекло и пластик, которые отправляются на переработку.

Объемы захоронения отходов за период 2015–2020 гг. снижались. На рис. 5 показана линия тренда $y = -8,7714x + 299,6$ (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9012$). Что касается доли высокотоксичных отходов (I и II классов опасности), то они обезвреживаются. Внедряются новые технологии регенерации отработанных масел и смазок, повторного использования электролита аккумуляторных батарей, трихлорэтилена, растворителя в машинах химической чистки рабочей одежды. Около 20 % отработанных масел собирают и подвергают регенерации, при которой производится их очистка от механических примесей. Ведется поэтапное замещение осветительных люминесцентных устройств на светодиодные. Все это позволяет сокращать объем образования отходов I класса опасности (ртутьсодержащих ламп) до нулевого уровня. Также с повторным вовлечением в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья, материалов и превращением отходов во вторичное сырье получают новую продукцию.

Обсуждение и заключение. Вопросы образования и утилизации отходов на железнодорожном транспорте в настоящее время весьма актуальны для обеспечения экологической безопасности окружающей природной среды. Выполненные авторами исследования динамики образования отходов производства и потребления на железнодорожном транспорте за последние семь лет показали, что в общем объеме преобладают практически неопасные отходы, образование которых уменьшается незначительно ($y = -109,32x + 2035,4$; $R^2 = 0,6818$) и наблюдается снижение объема захоронения отходов ($y = -8,7714x + 299,6$; $R^2 = 0,9012$). Это объясняется тем, что подразделениями успешно выполняются положения Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления по переработке вторичных ресурсов на период до 2030 г. Следуя данной Стратегии, предприятия железнодорожного транспорта проводят работу по утилизации отходов. Основная их масса (лом черных и цветных металлов, отработанные нефтепродукты) передается на сформированный

рынок. Практикуются новые подходы к обращению с отходами и принцип циклической экономики, в том числе рециклинг шпал, отработанного масла, лома черных и цветных металлов, отдельного накопления отходов на железнодорожных вокзальных комплексах. Большой объем отходов составляют бумага и картон, для его уменьшения реализуются мероприятия по внедрению электронного документооборота.

Как правило, наибольший объем отходов, направляемых на переработку, составляют полимерные отходы, процесс разложения которых является продолжительным. Авторы рассматривают в качестве перспективного направления варианты снижения интенсивности образования отходов и вовлечения их в производственный цикл в виде вторичных материальных ресурсов, что позволяет значительно снизить темп образования таких отходов и получить новые материалы для всех отраслей промышленности. Это, в свою очередь, может помочь решить вопросы экологической безопасности и отчасти импортозамещения.

Благодарности: авторы выражают благодарность членам редакционной коллегии и рецензентам.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the Editorial Board and the Reviewers of the Journal.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Khairullina L. B., Starikova G. V., Mamaeva N. L., Bulgakova E. V., Mikhailova M. N. To the Subject of Waste Disposal at the Site of Human Settlements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1061:012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1061/1/012004>.
2. Старикова Г. В., Мамаева Н. Л. Проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами г. Тюмени // Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 27 ноября 2019 г.: в 2 т. Тюмень: Тюменский индустриальный ун-т, 2020. Т. II. С. 241–245 [Starikova G. V., Mamaeva N. L. Problems of solid municipal waste management in Tyumen. In: *Arctic: Modern approaches to industrial and environmental safety in the oil and gas sector: Materials of the International Scientific and Practical Conference, 27 November 2019, Tyumen*. Tyumen, TIU; 2020. Vol. II. p. 241–245. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/vjkipfm>.

3. Ключкова Е. А. Промышленная, пожарная и экологическая безопасность на железнодорожном транспорте: учеб. пособие. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. 456 с. [Klochkova E. A. *Industrial, fire and environmental safety in railway transport*. Moscow: State Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in railway transport"; 2007. 456 p. (In Russ.)].
4. Карпова Д. В., Ковалева С. С. Деятельность ОАО «РЖД» в сфере экологической проблематики // Молодежная наука: труды XXVI Всерос. студенческой науч.-практ. конф. КРИЖТ ИрГУПС, Красноярск, 22 апреля 2022 г. Красноярск: ИрГУПС, 2022. Т. 3. С. 226–229 [Karpova D. V., Kovaleva S. S. The activities of JSC Russian Railways in the field of environmental issues. In: *Youth science: Proceedings of the XXVI All-Russian student scientific and practical conference of KRIZhT IrGUPS, 22 April 2022, Krasnoyarsk. Vol. 3: Section "Personnel management"; section "Operation of railways"*. Krasnoyarsk: IrGUPS; 2022. p. 226–229. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/gcoorf>.
5. Рязанов А. В. Экологические аспекты обращения с твердыми отходами некоторых транспортных предприятий в свете перехода на ноосферный путь развития // Вестник Тамбовского университета. 2013. Т. 18, вып. 3. С. 902–904 [Ryazanov A. V. Ecological aspects of solid waste management of some transport industries in the light of the transition to noosphere development way. *Tambov university review*. 2013;18(3):902–904. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pwmjvp>.
6. Ганаева О. А., Лугаськова Н. В. Современное состояние проблемы утилизации отходов на железнодорожном транспорте // Управление техносферой. 2020. Т. 3, вып. 2. С. 207–220 [Ganaeva O. A., Lugaskova N. V. The current state of the problem of waste disposal in railway transport. *Management of the Technosphere*. 2020;3(2):207–220. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.34828/UdSU.2020.28.99.004>.
7. Экологический аспект техносферной безопасности на железнодорожном транспорте / Т. С. Титова [и др.]. СПб., 2016. 265 с. [Titova T. S., Babak N. A., Makarova O. Yu., Tinus A. M., Shilova E. A. *Ecological aspect of technosphere safety in railway transport*. St. Petersburg; 2016. 265 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/ykzovj>.
8. Луценко А. Н., Катин В. Д., Луценко Ал. Н. Влияние железнодорожного транспорта на природную среду и пути его снижения на Дальневосточной железной дороге // Безопасность в техносфере. 2013. № 2. С. 56–61 [Lutsenko A. N., Katin V. D., Lutsenko Al. N. Railway Transport Influence on Environment and Ways of Its Decrease on Far East Railroad. *Safety in the Technosphere*. 2013;(2):56–61. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/pzyofb>.
9. Крошечкина И. Ю., Зубрев Н. И. Загрязнение поверхностных горизонтов почвы при эксплуатации железнодорожного транспорта // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. 2016. № 3 (91). С. 11–17 [Kroshechkina I. Yu., Zubrev N. I. Contamination of surface soil horizons during the operation of railway transport. *I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin*. 2016;(3):11–17. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/wkuutn>.
10. Воробьева О. В., Бельков В. М. Миграция нефтепродуктов в дренирующих грунтах железнодорожного полотна // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2011. № 6. С. 7–11 [Vorobyeva O. V., Belkov V. M. Migration of oil products in drainage soils of railway subgrade. *Russian Railway Science Journal*. 2011;(6):7–11. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/okhqmf>.
11. Бархатов В. И., Добровольский И. П. Повышение эффективности переработки нефти и использования получаемых продуктов. Челябинск: Изд-во Челябинского гос. ун-та, 2013. 322 с. [Barkhatov V. I., Dobrovolskiy I. P. Improvement of oil refining and use of refined products. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publishing; 2013. 322 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rufyxf>.
12. Якубовский Ю. Е., Кусков К. В. Малотоннажная химия в переработке полимеров нефтехимии // Наука и технологии Сибири. 2022. № 5. С. 106–110 [Yakubovskiy Yu. E., Kuskov K. V. Low-tonnage chemistry in the processing of petrochemical polymers. *Nauka i tekhnologii Sibiri*. 2022;(5):106–110. (In Russ.)].
13. Якубовский Ю. Е., Хайруллина Л. Б. Развитие технологий с использованием малотоннажной химии в переработке термопластичных полимеров // Перспективные технологии и материалы: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Севастополь, 21–23 сентября 2022 г.: сб. науч. тр. / ред. Т. В. Чайка. Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2022. С. 430–432 [Yakubovskiy Yu. E., Khairullina L. B. Development of technologies using low-tonnage chemistry in the processing of thermoplastic polymers. *Perspective technologies and materials: Materials of the international scientific and practical conference, 21–23 September 2022, Sevastopol*. Sevastopol: Sevastopol State University; 2022. p. 430–432. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/tiovwa>.
14. Донкова И. А., Якубовский Ю. Е., Колосов В. И. Моделирование и расчет ремонтируемого участка трубопровода на основе композитно-муфтовой технологии // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Т. 8, № 3 (31). С. 140–154 [Donkova I. A., Yakubovskiy Yu. E., Kolosov V. I. Modeling and calculation of a pipeline section repaired on the basis of composite-coupling technology. *Tyumen state university herald. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. 2022;8(3):140–154. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-3-140-154>.
15. Yakubovskiy Yu., Kolosov V. Physically Nonlinear Bending of Composite Plates. In: Borodinecs A., Vatin N., Sergeev V. (eds). *Proceedings of EECE 2019: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, 19–20 November 2019, St. Petersburg, Russia*. Cham: Springer; 2020. p. 307–318.
16. Yakubovskiy Yu., Donkova I., Okaev E. Calculation of Composite Panel Multilayer Structures in Construction Systems. In: Borodinecs A., Vatin N., Sergeev V., eds. *Proceedings of EECE 2019: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, 19–20 November 2019, St. Petersburg, Russia*. Cham: Springer; 2020. p. 423–432.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лариса Батыевна ХАЙРУЛЛИНА,

канд. техн. наук, доцент, кафедра техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет (ТИУ, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38), Author ID: 815565, <https://orcid.org/0009-0005-8612-2934>

Наталья Леонидовна МАМАЕВА,

старший преподаватель, кафедра техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет (ТИУ, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38), Author ID: 793213, <https://orcid.org/0000-0002-1953-8412>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larisa B. KAIRULLINA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Technosphere Safety Department, Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, 38, Volodarskogo St.), Author ID: 815565, <https://orcid.org/0009-0005-8612-2934>

Natali L. MAMAEVA,

Senior Lecturer, Technosphere Safety Department, Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, 38, Volodarskogo St.), Author ID: 793213, <https://orcid.org/0000-0002-1953-8412>

ВКЛАД АВТОРОВ

Лариса Батыевна ХАЙРУЛЛИНА. Формирование направления исследования, его актуальность, постановка цели и задач, обсуждение результатов. Фундаментальные исследования способов и методов развития малотоннажной химии, получения композитных материалов (50%).

Наталья Леонидовна МАМАЕВА. Анализ научных работ по переработке вторичного сырья. Подбор статистических данных образования отходов на железнодорожном транспорте, обсуждение результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Larisa B. KHAIRULLINA. Determining the line of research, its relevance, setting goals and objectives, discussing the results.

Fundamental research methods for the development of low-tonnage chemistry, the production of composite materials (50%).

Natali L. MAMAEVA. Analysis of research on the recycling process. Selection of statistical data on waste generation in railway transport, discussion of the results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 24.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 15.05.2023, принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 30.03.2023, first review received 24.04.2023, second review received 15.05.2023, accepted for publication 19.07.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

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

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучение принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

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

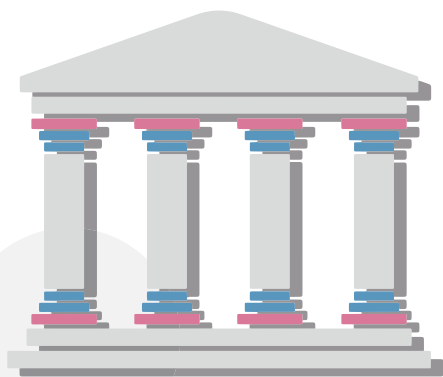


АСПИРАНТУРА ВНИИЖТ

АО «ВНИИЖТ» предоставляет широкие возможности повышения научной квалификации в аспирантуре

◆ **Уникальная материально-техническая база для проведения научных исследований**

◆ **Кадровый научный потенциал института**



более

100

лет научного опыта

17

научных центров

26

докторов наук



испытательный центр железнодорожной техники

48

отделов и лабораторий

109

кандидатов наук



скоростной испытательный полигон (г. Белореченск)



Экспериментальное кольцо (г. Щербинка)



СПЕЦИАЛЬНОСТИ ПОДГОТОВКИ



2.9.2

Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



2.9.3

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



2.9.4

Управление процессами перевозок



2.3.3

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (на железнодорожном транспорте)



2.6.1

Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов



2.6.17

Материаловедение (на железнодорожном транспорте)



2.5.3

Трение и износ в машинах



5.2.3

Региональная и отраслевая экономика



129626, Москва,
3-я Мытищинская ул., д.10, каб. 304



+7 (495) 602-82-30



www.vniizht.ru



Лицензия
на осуществление
образовательной
деятельности



МОНОГРАФИИ И СБОРНИКИ

Научно-издательский отдел предлагает приобрести Труды АО «ВНИИЖТ»:

- Рожицкий Д.Б. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов. М.: ООО «РАС», 2022. 322 с.
- Косарев А.Б., Виноградов С.А., Король Ю.Н., Косарев И.А. Электробезопасность электроустановок транспорта. М.: ООО «РАС», 2022. 448 с.
- Кондрашов В.М., Максимов И.Н. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей. М.: ООО «РАС», 2022. 105 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / Под ред. С.М. Захарова. М.: ИННА, 2021. 455 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 2. Грузовые локомотивы / Под ред. С.М. Захарова. М.: ИННА, 2021. 344 с.
- Марков Д.П. Атомно-молекулярные механизмы вещественного трения. М.: ООО «РАС», 2019. 102 с.
- Косарев А.Б., Гогричиани Г.В. Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 1. М.: ООО «РАС», 2019. 272 с.
- Косарев А.Б., Гогричиани Г.В. Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 2. М.: ООО «РАС», 2019. 300 с.
- Ромен Ю.С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. М.: ООО «РАС», 2019. 160 с.
- АСУ «Экспресс» - автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / Под ред. А.В. Комиссарова. М.: ООО «РАС», 2019. 168 с.
- Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / Под ред. А.М. Бржезовского. М.: ООО «РАС», 2019. 148 с.
- Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / Под ред. О.Ф. Мирошниченко. М.: ООО «РАС», 2019. 210 с.
- Певзнер В.О. Научные основы системы управления состоянием пути. М.: ООО «РАС», 2018. 272 с.
- Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / Под ред. А.Б. Косарева, О.Н. Назарова. М.: ООО «РАС», 2018. 119 с.
- Особенности системы ведения рельсового хозяйства на Российских железных дорогах / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ООО «РАС», 2017. 160 с.
- Вопросы развития железнодорожного транспорта / Под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричиани, М.: ООО «РАС», 2017. 272 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо-рельс / Под ред. С.М. Захарова, М.: ООО «Интекст», 2017. 420 с.
- Савин А.В. Безбалластный путь. М.: ООО «РАС», 2017. 192 с.
- Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава / Под ред. А.Я. Когана, Э.Д. Загитова, И.В. Полещук. М.: ООО «РАС», 2016. 208 с.
- Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем) / Под ред. В.Я. Берента. М.: ООО «Аналитика Родис», 2016. 328 с.
- Антюхин Г.Г., Поварков И.Л. Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами. М.: ООО «Аналитика Родис», 2016. 101 с.
- Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: ООО «Издательство «Научный мир», 2015. 200 с.

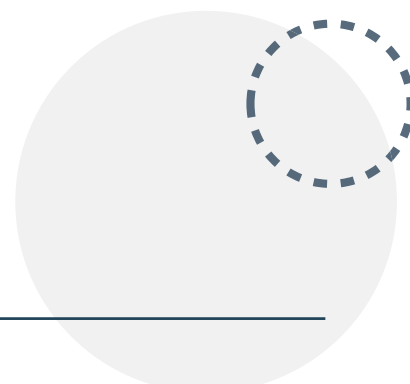
- Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.
- Тюрнин П.Г., Тибилов А.Т., Миронос Н.В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 162 с.
- Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. 208 с.
- Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейн, А.И. Молчанов, С.А. Виноградов, К.М. Попов, Е.Н. Школьников. М.: ВМГ-Принт, 2014. 141 с.
- Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ВМГ-Принт, 2014. 125 с.
- Актуальные проблемы экономики железнодорожного транспорта и пути их решения / Под ред. О.Ф. Мирошниченко. М.: ВМГ-Принт, 2014. 255 с.
- Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России. Научно-методическое пособие / Под ред. М.М. Толкачевой, Г.Е. Писаревского. М.: ООО «Интекст», 2014. 152 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе / Под ред. Б.М. Лapidуса, Г.В. Гогричани. М.: ВМГ-Принт, 2014. 292 с.
- Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник / Под ред. П.И. Дыдышко. М.: ООО «Интекст», 2014. 416 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе развития / Под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричани. М.: ООО «Интекст», 2013. 288 с.
- Путь и путевое хозяйство. Взаимодействие колеса и рельса / Под ред. М.М. Железнова. М.: ООО «Интекст», 2013. 236 с.
- Лapidус Б.М. Железнодорожный бизнес: как встать на главный путь. М.: ООО «Интекст», 2013. 383 с.
- Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее / Под ред. Б.М. Лapidуса, Д.А. Мачерета. М.: КРАСАНД, 2013. 324 с.
- Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / Под ред. В.О. Певзнера, Ю.С. Ромена. М.: ООО «Интекст», 2013. 224 с.
- Экспериментальные исследования процессов движения подвижного состава / Под ред. А.В. Заручейского, П.Т. Гребенюка. М.: ООО «Интекст», 2013. 80 с.
- Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ООО «Интекст», 2013. 152 с.
- Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейна. М.: ООО «Интекст», 2012. 56 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / Под ред. С.М. Захарова. М.: ООО «Интекст», 2012. 568 с.
- Проблемы железнодорожного транспорта. Задачи и пути их решения / Под ред. Б.М. Лapidуса, Г.В. Гогричани. М.: ООО «Интекст», 2012. 260 с.
- Энергооптимальные методы управления движением поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейна, И.А. Ябко А.Е. Илютовича. М.: ООО «Интекст», 2012. 80 с.

**Актуальная информация
о Трудах ВНИИЖТ доступна
на сайте (переход через
QR-код):**



По вопросам приобретения книг и за справочной информацией обращаться в научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ»:

Anokhov.Igor@vniizht.ru
rio@vniizht.ru
тел.: +7 (495) 602-83-01, +7 (495) 602-84-56





ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ 2023

16-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта и городской мобильности www.publictransportweek.ru



27-29 СЕНТЯБРЯ
МОСКВА

ЦВК ЭКСПОЦЕНТР
WWW.E-TRANSPORT.RU

