



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



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 83, №1. 2024

Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Том 83, №1. 2024

Издаётся с 1942 г.
Published since 1942

17-я международная выставка



ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ

информационные технологии и электроника для пассажирского
транспорта и транспортной инфраструктуры



2024

26-28 июня
Москва
Экспоцентр

+7 (495) 287-44-12

info@e-transport.ru

www.e-transport.ru

ISSN 2223–9731 (Print)

ISSN 2713–2560 (Online)

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 83, №1. 2024

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», 2024

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

Карасев Михаил Николаевич, канд. юрид. наук, директор научно-образовательного центра, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

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>

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., МГИМО, 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>

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

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

Науменко Сергей Николаевич, д-р техн. наук, ученый секретарь, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

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, директор научного центра, АО «ВНИИЖТ», 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>

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

Липидус 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

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. 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,

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 26.03.2024. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,5. Тираж 300 экз. Заказ 201. 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

Mikhail N. Karasev, Cand. Sci. (Jur.), Director of the Science and Education Center, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

EDITORIAL BOARD

Odil 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>
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, Moscow State Institute of International Relations, 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>

Li Xuwei, Dr. Sci., Professor, Vice-President of the Engineering Union of China Transport System, Beijing Jiaotong University, China
Olga F. Miroshnichenko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>
Sergey N. Naumenko, Dr. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>
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.), Associate Professor, Director of the Scientific Center, Railway Research Institute, 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>
Sergey V. Fedorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>
German S. Fox-Rabinovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of McMaster Engineering University, Hamilton, Ontario, Canada, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>
Said S. Shaumarov, 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
Lev A. Muginshtein, Dr. Sci. (Eng.), 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 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 26.03.2024. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 11.5 printed sheets. 300 copies. Order No. 201. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах
К. М. Попов 9–23

Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей
А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская 24–39

Экспериментальная оценка возможностей теплового аккумулятора с целью использования в масляной системе дизеля маневрового тепловоза
А. А. Свечников, Ю. К. Мустафаев, И. В. Метальников 40–49

Сравнительный анализ чувствительности ультразвукового контроля при применении прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей различных производителей на примере дефектоскопа УД2-102 «Пеленг»
А. Г. Отока, О. В. Холодилов 50–58

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Актуализация параметров «расчетных бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок
С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов 60–68

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа
Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин 70–80

ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Корпус буксы грузового вагона из алюминиевого сплава: опыт разработки, производства и эксплуатационных испытаний (1958–1993 гг.) и современные перспективы
А. В. Лапа, И. С. Гершман, С. В. Новиков 82–90

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

**Energy efficiency of different modes of motor-car rolling stock operation
on partially electrified routes**

Kirill M. Popov 9–23

Generation of geometric irregularities as random disturbances causing rail cab oscillations

Anatoliy N. Savoskin, Nataliya S. Lavlinskaya 24–39

**Experimental evaluation of thermal accumulator capabilities for use in the oil system
of shunter diesel motor**

Alexandr A. Svechnikov, Yuriy K. Mustafaev, Ilya V. Metalnikov 40–49

**Comparative analysis of ultrasonic control sensitivity in using straight
and angle piezoelectric transducers of different manufacturers on the example
of flaw detector UD2-102 Peleng**

Alexander G. Otoka, Oleg V. Kholodilov 50–58

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Updating the parameters of “calculated runners” used in the design of gravity humps

Sergey A. Bessonenko, Anton A. Gunbin, Alexander A. Klimov 60–68

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Reducing power line interference with the continuous automatic cab signalling channel

Ruslan R. Yusupov, Alexey S. Khokhrin 70–80

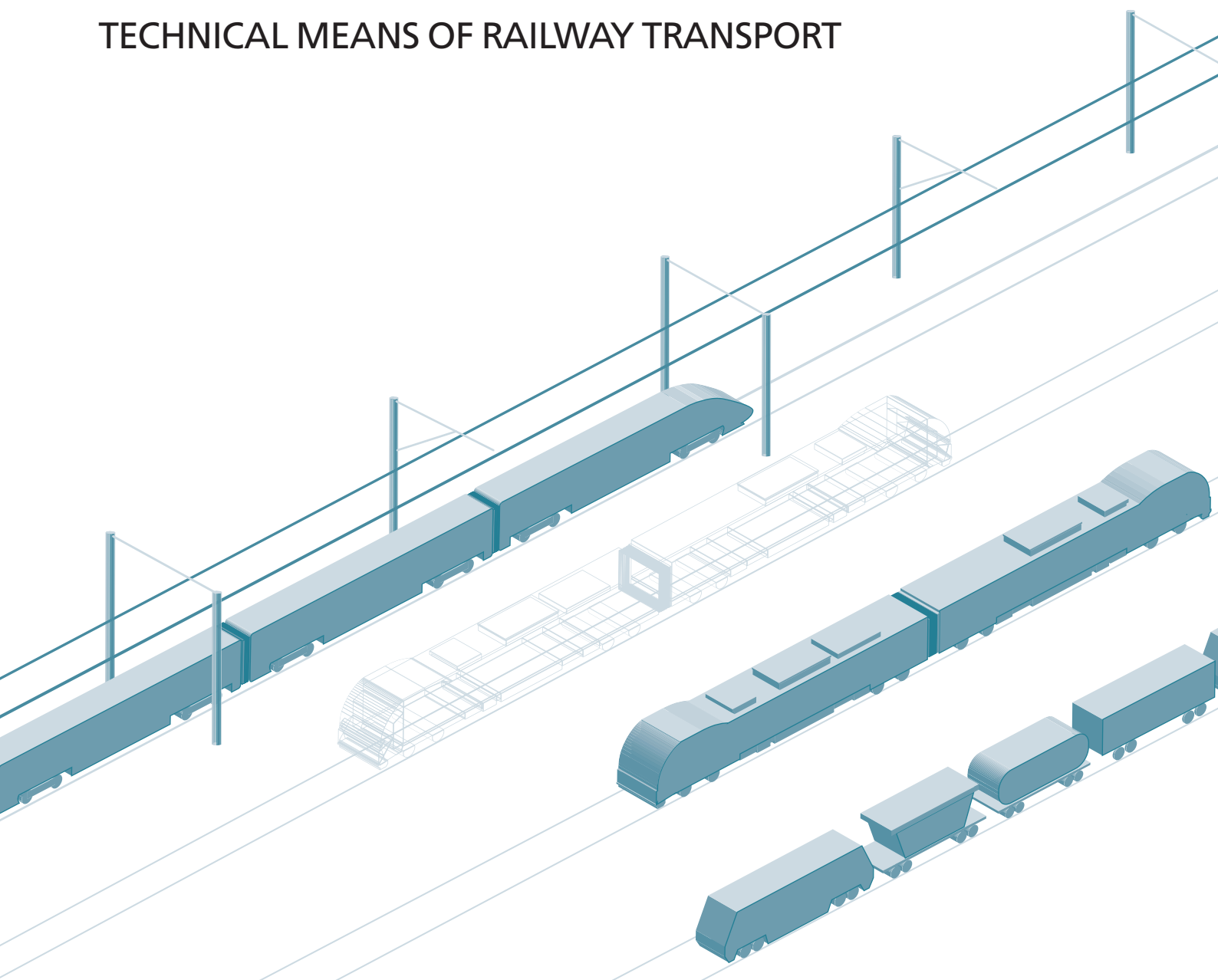
TRANSPORT MATERIALS SCIENCE

**Aluminium alloy wagon axle box: experience of development, production
and operational tests (1958–1993) and modern prospects**

Alexander V. Lapa, Iosif S. Gershman, Sergey V. Novikov 82–90

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.424.2 + 629.4.016.2

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

Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах

К. М. Попов✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена эксплуатация межрегиональных экспрессов, обслуживаемых электрическим моторвагонным подвижным составом, часть маршрута которых проходит по неэлектрифицированным участкам. На этих участках тягу электропоезда осуществляет пассажирский тепловоз, который обеспечивает также электропитание собственных нужд электропоезда и системы поддержания микроклимата в салонах. Цель исследования — сравнение энергетических показателей различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на смешанных маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки.

Материалы и методы. Проанализированы достигнутые в эксплуатации значения расхода топливно-энергетических ресурсов для ряда электрифицированных и неэлектрифицированных участков, в том числе связанные с обеспечением энергетических потребностей на собственные нужды электрического моторвагонного подвижного состава и работу систем поддержания микроклимата в салонах. Осуществлено сравнение энергозатрат при использовании на этих участках различных серий тягового подвижного состава.

Результаты. Получены данные по расходу топлива для тепловоза с электропоездом и дизель-поезда в зависимости от составности и времени года, а также показатели удельного расхода топлива для тепловоза, ведущего электропоезд, и дизель-поезда в зоне отрицательных температур, т. е. при гарантированно включенном отоплении.

Обсуждение и заключение. Показано, что использование тепловоза для тяги электропоезда по энергозатратам менее выгодно, чем использование дизель-поезда. Приведенные в статье сравнительные характеристики энергозатрат при различных вариантах эксплуатации моторвагонного подвижного состава на неэлектрифицированных участках являются предварительной оценкой. При сохранении актуальности данных исследований следующим этапом должна стать обработка данных от бортовых систем регистрации и проведение сравнительных испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моторвагонный подвижной состав, энергетическая эффективность, альтернативный вариант эксплуатации, система электроснабжения состава, система обеспечения микроклимата, данные маршрутов машиниста

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Попов К. М. Энергоэффективность различных вариантов эксплуатации моторвагонного подвижного состава на частично электрифицированных маршрутах // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 9–23.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.424.2+629.4.016.2

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



Energy efficiency of different modes of motor-car rolling stock operation on partially electrified routes

Kirill M. Popov✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers the operation of interregional express trains operated by electric motor-car rolling stock whose route partly runs along non-electrified sections. These sections have electric trains hauled by a passenger diesel locomotive that also supplies electricity for the electric train auxiliary needs and the cabin microclimate system. The research is intended to compare the energy indicators of different modes of motor-car rolling stock operation on mixed routes with electrified and non-electrified sections.

Materials and methods. The paper analyses the actual operational consumption of fuel and energy resources for a number of electrified and non-electrified sections, including electricity supply for auxiliary needs of electric motor-car rolling stock and the cabin microclimate system. The paper compares the energy consumption of these sections for different series of tractive rolling stock.

Results. The author obtained data on the fuel consumption of a diesel locomotive with an electric train and a diesel train depending on the train composition and time of year, as well as indicators of specific fuel consumption for a diesel locomotive driving an electric train and a diesel train in negative temperature zones, i. e. with operating heating.

Discussion and conclusion. The study shows that a diesel locomotive for electric train traction is less feasible than a diesel train in terms of energy consumption. The author gives a preliminary assessment of comparative characteristics of energy consumption under different modes of motor-car rolling stock operation on non-electrified sections. If these research data remain relevant, the next stage should include data processing from on-board registration systems and comparative testing.

KEYWORDS: motor-car rolling stock, energy efficiency, alternative operation mode, train electric power supply system, microclimate system, engine driver route data

FOR CITATION: Popov K. M. Energy efficiency of different modes of motor-car rolling stock operation on partially electrified routes. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):9-23. (In Russ.).

Введение. Энергетические преимущества мотор-вагонного подвижного состава (МВПС) перед локомотивной тягой в пригородном пассажирском движении хорошо известны [1, 2], и при наличии в рабочем парке депо электро- и дизель-поездов они широко используются на пригородных маршрутах. В межрегиональных пассажирских перевозках эффективность МВПС не столь очевидна и связана с заложенной в расписание максимальной скоростью, количеством остановок, а также протяженностью маршрута и, соответственно, временем в пути, которое пассажиры готовы провести в преимущественно сидячем положении. В последние годы дополнительным аргументом в пользу использования МВПС на межрегиональных маршрутах стало появление комфортабельных электропоездов разных модификаций ЭС1, ЭС1П, ЭС2ГП (далее — ЭС) с повышенной до 160 км/ч скоростью — максимальной в сравнении с традиционными сериями МВПС. С появлением этих поездов связан и ввод в эксплуатацию экспрессов, часть маршрута следующих по неэлектрифицированным участкам. На последних тягу ЭС осуществляет пассажирский тепловоз ТЭП70БС.

С 2018 г. такая технология используется на участках Владимир — Иваново, с 2020 г. — Санкт-Петербург — Валдай — Старая Русса, с 2021 г. — Волоколамск — Муравьёво, с 2023 г. — Иваново — Нижний Новгород. При этом системы собственных нужд, включая обеспечение микроклимата в салонах МВПС, получают питание от дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза, для передачи электроэнергии используется специальная двухпроводная система энергоснабжения [3]. Когда тепловоз с номинальной мощностью дизеля 2940 кВт, предназначенный для тяги пассажирских составов массой 1000 т и более, эксплуатируется с поездами массой около 300 т, он не всегда работает с полной нагрузкой, а значит, в оптимальных по расходу топлива режимах. Однако номинальная мощность 5-вагонного ЭС, составляющая 2560 кВт, сопоставима с тяговой мощностью тепловоза ТЭП70БС (2040 кВт), остающейся после вычета мощности системы электро-снабжения состава (СЭС). Это позволяет тепловозу ТЭП70БС при тяге ЭС реализовывать сопоставимую с самостоятельно движущимся ЭС максимальную скорость движения, хотя на разгонную динамику будет дополнительно влиять инерционность дизеля при наборе им мощности.

При этом открытым остается вопрос, с какой эффективностью вырабатывается электроэнергия для

собственных нужд ЭС, включая систему обеспечения микроклимата.

Отметим, что опыт тяги МВПС магистральными тепловозами не нов. Помимо практиковавшейся в 90-е гг. тяги магистральными тепловозами дизель-поездов, имеющих определенные неисправности, можно вспомнить дизель-поезда ДДБ1 [4], построенные в 2004–2005 гг. для Белорусской железной дороги. Все 20 составов до сих пор эксплуатируются. Это поезда постоянного формирования, т. е. моторных вагонов в составе ДДБ1 нет и секция тепловоза М62 или М62У постоянно соединена с прицепными вагонами от электропоезда. Неизменность схемы формирования определяется тем, что ДДБ1 не выезжают на электрифицированные участки.

Возникновение вопроса об эффективности тяги МВПС тепловозами ТЭП70БС связано с появлением в 2019 г. сопоставимого по комфорту с ЭС современного дизель-поезда РА-3. Также актуальность исследования обусловлена постоянно растущими ценами на дизельное топливо и необходимостью поиска резервов его экономии.

Целью исследования является сравнение энергетических показателей различных вариантов эксплуатации МВПС на смешанных маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки. Результаты исследования могут стать составной частью технико-экономической оценки этих вариантов.

Особенности существующих и перспективных систем энергоснабжения пассажирских вагонов. При рассмотрении вариантов организации пассажирских перевозок на неэлектрифицированных маршрутах важным моментом является эффективность энергоснабжения системы поддержания микроклимата в салонах и, в случае использования МВПС, энергоснабжения прочих собственных нужд.

Исследования по данному вопросу проводились в двух направлениях: получение электропитания от тепловоза и от специализированных вагонов (вагонов-электростанций). В последнем случае следует оговориться, что ранее вагоном-электростанцией считался вагон, на котором содержалось электрическое оборудование для преобразования постоянного напряжения 3 кВ (от электровагона) в трехфазное переменное 380/220 В¹. В настоящее время вагон-электростанция — это вагон с одним или несколькими дизель-генераторами для непосредственной выработки электроэнергии [5].

Первым отечественным тепловозом с СЭС был опытный тепловоз ТЭП75. Серийно СЭС появилась на

¹ Вагон-электростанция [Электронный ресурс]. URL: http://cmzt.narod.ru/news/vagon_ehlektrostancija_chast_2/2022-12-04-1445 (дата обращения: 15.12.2023).

тепловозе ТЭП70БС. Особенностью СЭС на данном тепловозе является то, что при ее работе минимальная частота вращения коленчатого вала дизеля на холостом ходу увеличивается с 350 до 675 мин⁻¹, а тяговая мощность тепловоза снижается с 2670 до 2040 кВт [6], т. е. почти на четверть (23,6 %). Еще до начала серийного выпуска тепловозов с СЭС были предложены проектные технические решения [7, 8], направленные на повышение ее эффективности. В [7] оговаривалось снижение в эксплуатации минимальной позиции контроллера при работе СЭС вплоть до второй, с учетом распределения потребной мощности отопления по времени года, определяемой изменением температуры атмосферного воздуха. В [8] было предложено перераспределять мощность дизель-генератора между мощностью на тягу тепловоза и мощностью на СЭС путем поддержания суммарного значения, соответствующего минимальному удельному эффективному

расходу топлива. Указанное перераспределение, по мнению авторов, могло быть обеспечено в том числе за счет варьирования мощности СЭС с ограничением по снижению температуры в вагонах не ниже 18 °С. В [6] была приведена расчетная экономия топлива: до 6,5 % — на стоянке, 1,5–2 % — в поездке. В [8] аналогичная величина оценена на уровне 0,5–1,5 %.

В качестве альтернативы электрическому отоплению в [9] был предложен проект энергоснабжения вагонов от тепловоза ТЭП70БС, выполненный по технологии, схожей с применявшейся на дизель-поездах Д1 и ДР1, но с использованием теплоты не воды, охлаждающей дизель, а отработавших газов дизеля.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики различных СЭС.

Максимальная мощность, потребляемая системой отопления 5-вагонного ЭС, составляет 315 кВт, с учетом других собственных нужд ЭС (мотор-компрессор,

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных СЭС

Table 1

Comparative characteristics of different train power supply systems

Варианты системы энергоснабжения	Номинальная мощность, кВт	Преимущества по сравнению с исходной СЭС	Недостатки
Штатная ТЭП70БС, однопроводная (исходная система)	600	—	Минимальная позиция контроллера при работе СЭС — шестая, что обусловлено влиянием СЭС на СЦБ и необходимостью поддержания минимального напряжения СЭС — 2,6 кВ. Невозможность эксплуатации без модернизации путевых устройств
Проект с пониженной минимальной частотой вращения коленчатого вала дизеля при работе СЭС [7]	588	Максимальное снижение доли работы ДГУ с СЭС в режимах с низкой энергоэффективностью	Невозможность реализации без установки специальных помехоподавляющих фильтров, исключающих влияние СЭС на СЦБ
Проект с оперативным перераспределением мощности на тягу и для СЭС [8]	600		Влияние системы регулирования СЭС на температуру воздуха в вагонах
Штатная ТЭП70БС, двухпроводная	600	Отсутствие влияния на СЦБ, отсутствие необходимости модернизации путевых рельсовых цепей на участках эксплуатации	Необходимость прокладки обратной высоковольтной линии во всех вагонах, эксплуатирующихся с данной системой
Проект [9] с использованием теплоты отработавших газов дизеля	754 (для номинальной мощности ДГУ)	Отсутствие дополнительных затрат топлива на отопление	Расчеты выполнены для номинальной мощности дизеля, доля времени работы на которой в эксплуатации невелика. Необходимость модернизации всех вагонов, эксплуатирующихся с данной системой
Вагон-электростанция [5]	1350 (3×450)	Отсутствие влияние на тяговую мощность локомотива, высокая энергоэффективность за счет стационарного номинального режима работы потребного количества ДГУ	Потребность в операторе для обслуживания вагона, дополнительные затраты топлива на тягу самого вагона-электростанции

освещение, привод дверей и др.), мощность которых в неавтономном режиме существенно меньше номинальной, суммарно — не более 400 кВт. Из табл. 1 видно, что мощность вагона-электростанции в данном случае явно избыточна, а номинальная мощность СЭС тепловоза ТЭП70БС с запасом в примерно $\frac{1}{3}$ обеспечивает максимально потребляемую ЭС.

С учетом преимуществ и недостатков рассмотренных систем СЭС можно сделать вывод о том, что возможность энергоснабжения при минимальных дополнительных конструктивных изменениях сопутствующих элементов, в том числе и напольного оборудования железных дорог, обеспечивает тепловоз ТЭП70БС с двухпроводной СЭС, т. е. используемый в эксплуатации вариант. В части преимуществ предложения [8] отметим, что согласно руководству по эксплуатации тепловоза ТЭП70БС, мощность, отдаваемая в СЭС, зависит от частоты вращения коленчатого вала n_d и температуры наружного воздуха τ : максимальная мощность (600 кВт) обеспечивается при номинальной n_d и τ от 0 и ниже, минимальная мощность (250 кВт) — при $n_d = 0,7$ от номинальной и τ выше 15°C . Ниже будут рассмотрены достигнутые в эксплуатации затраты топлива на СЭС, в том числе в сравнении с расчетными значениями.

Действующие и альтернативные варианты эксплуатации МВПС. Основную действующую в настоящее время схему обслуживания МВПС смешанных маршрутов, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки, при сравнительном анализе рассмотрим в сопоставлении с альтернативными вариантами, связанными с изменением используемой серии МВПС. Альтернативами текущему варианту при использовании ЭС (вариант 1), с меньшим временем реализации, можно рассматривать варианты, практиковавшиеся до начала эксплуатации ЭС:

- пересадку пассажиров на станции, где заканчивается электрификация, с электропоезда на дизель-поезд (вариант 2),
- движение дизель-поезда на всем маршруте (вариант 3).

Примером варианта 3 может служить многолетняя эксплуатация дизель-поездов на участке Москва — Узловая и относительно недавний запуск туристических дизель-поездов Москва — Переславль-Залесский. Однако вариант 3 не отвечает современной экологической повестке. Поэтому в качестве более отдаленной по времени реализации альтернативой может рассматриваться предложенная в [10] перспективная технология модернизации ЭС путем установки тяговых аккумуляторных батарей (вариант 4). После указанной модернизации, по заявлениям авторов проекта, будет возможно эксплуатировать ЭС на неэлектрифицированных участках протяженностью до 150 км с максимальной скоростью до 140 км/ч.

Таблица 2

Варианты эксплуатации МВПС на маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки

Table 2

Modes of motor-car rolling stock operation on routes with electrified and non-electrified sections

Вариант	Серия МВПС на электрифицированной части маршрута	Серия МВПС на неэлектрифицированной части маршрута
1 (базовый)	ЭС	ЭС с тепловозом ТЭП70БС во главе поезда
2	ЭС	РА-3 (пересадка пассажиров)
3	РА-3	РА-3
4	ЭС	ЭС с накопителями энергии

Отметим, что в основном используемом варианте эксплуатации (вариант 1) стоянка ЭС на станции окончания электрификации в ожидании прицепки в голову поезда тепловоза составляет не менее 20 мин. Если рассматривать вариант дружественной к пассажирам пересадки с электропоезда на дизель-поезд, стоящий на соседнем пути, т. е. в пределах одной и той же платформы, имеющей защиту от атмосферных осадков, то потери времени при стоянке на станции окончания электрификации можно сократить в 3–4 раза. Если при этом сохранить общее время в пути, то станет возможно снизить среднюю скорость движения, а значит, и энергозатраты. Особенности рассмотренных вариантов показаны в табл. 2.

Возможность более детализированного сравнения рассматриваемых вариантов определим далее с учетом достигнутых показателей текущей эксплуатации по базовому варианту, а также изучения конструктивных особенностей сопоставляемых серий МВПС.

Параметры текущей эксплуатации МВПС на маршрутах, включающих электрифицированные и неэлектрифицированные участки. Для определения возможности сравнения энергетических характеристик эксплуатации электропоездов серии ЭС и дизель-поездов РА-3, помимо основных идентификационных характеристик участков их эксплуатации, приведем также те характеристики, которые напрямую влияют на расход электроэнергии и топлива. Это параметры организации движения поездов и профиля пути, которые сведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что на участках с электрификацией движение ЭС реализовано с большими скоростями, чем на неэлектрифицированных, на последних параметры движения ЭС сопоставимы с достигаемыми на участках эксплуатации РА-3. Стоит учесть, что увеличение времени движения за счет сокращения времени 20-минутной стоянки на станциях окончания электрификации позволит снизить среднюю

Таблица 3

Характеристики отдельных участков эксплуатации поездов ЭС и РА-3

Table 3

Characteristics of individual sections of operation of ES and RA-3 trains

Наименование показателей	Участок эксплуатации									
	Москва — Иваново		Санкт-Петербург — Валдай — Старая Русса			Москва — Муравьёво		Кинешма — Иваново (экспресс)	Курск 1 — Воронеж	Москва — Узловая
	Москва — Владимир	Владимир — Иваново	Санкт-Петербург — Бологое	Бологое — Валдай	Бологое — Валдай — Старая Русса	Москва — Волоколамск	Волоколамск — Муравьёво			
Электрификация	есть	нет	есть	нет	нет	есть	нет	нет	нет	около 50 % длины
Серия тягового подвижного состава	ЭС1П	ТЭП70БС+ЭС1П	ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П/ЭС2ГП	ЭС1П/ЭС2ГП	ТЭП70БС+ЭС1П	РА-3	РА-3	РА-3
Основная составность, вагонов	5	5	5	5	5	5	5	3	2	2
Длина участка, км	191	144	319	50	172	129	117	92	246	239
Средняя техническая скорость, км/ч	116	91	117	65	63	61	65	55	83	63,7
Общее время движения (в одну сторону), ч	1,65	1,58	3,47	0,8	2,92	1,9	1,9	1,8	3	3,75
Количество остановок в пути следования (в одну сторону)	0	1	13	1	6	2	6	5	5	4
Доля элементов 3‰ и менее, %	63	58	76	66	76	26	39	44	34	32
Тип профиля по классификации в [11]	I	II	I	II	I	IV	III	II	III	III

скорость движения при сохранении суммарного времени в пути. Довольно высокая максимальная скорость на участке Москва — Владимир обусловлена хорошим состоянием пути (на этом участке эксплуатировались в том числе высокоскоростные поезда ЭВС2) и его не сложным профилем.

Достигнутые значения энергозатрат на тягу были получены на основе обработки данных по исходной выборке из более 3500 маршрутов машиниста, выгруженных из автоматизированной системы централизованной обработки маршрутов машиниста (АС ЦОММ). Эта выборка включала данные за период с января по сентябрь 2023 г. по ранее указанным (табл. 3) участкам. Для каждого календарного месяца были определены средние значения абсолютного и удельного, отнесенного к перевозочной работе, расхода

топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также средние квадратические отклонения (СКО). На основе правила «трех сигм» были исключены из дальнейшего рассмотрения выбросы — поездки с, вероятно, ошибочным расходом ТЭР. Также по указанным месяцам на основе общедоступного архива погоды² и усреднения температуры для конкретного участка по метеостанциям, расположенным в его границах, были определены средние за месяц значения температуры атмосферного воздуха. С использованием этих данных были построены зависимости удельного расхода электроэнергии (рис. 1) и топлива (рис. 2, 3) от температуры, отдельно для электрической и дизельной тяги, в последнем случае — отдельно для ТЭП70БС (рис. 2) и РА-3 (рис. 3).

В табл. 4 приведены средние энергозатраты на поездку по конкретному участку в обе стороны по тем

² rp5.ru. Расписание погоды: [сайт]. URL: <https://rp5.ru>.

календарным месяцам, в которых они являются минимальными из рассмотренных, а также разница со значениями по месяцам, в которых эти энергозатраты являются максимальными. Эта разница в наибольшей степени должна определяться отличиями в режиме работы системы обеспечения микроклимата.

Из рис. 1 видно, что на участках Москва — Владимир и Санкт-Петербург — Бологое удельный расход электроэнергии выше, чем на участке Москва — Волоколамск. Это во многом может быть объяснено существенным отличием значений средней технической скорости. Из табл. 3 видно, что на участках Москва — Владимир и Санкт-Петербург — Бологое она практически совпадает и равна 116 и 117 км/ч соответственно, а на участке Москва — Волоколамск ее величина практически в два раза ниже — 61 км/ч. Анализируя полученные результаты, важно учитывать, что в настоящем исследовании, как и в существующей отчетности, расчет удельного расхода ТЭР осуществляется на основе перевозочной работы, определенной не по фактической массе МВПС, которая в маршрутах машиниста не фиксируется, а для постоянной учетной массы, соответствующей номинальной населенности поезда. При этом известно, что расход ТЭР во многом зависит от фактической населенности, которая может изменяться во времени.

Сравнение рис. 2 и 3, а также данных в табл. 4 показывает, что удельный расход топлива на участках с локомотивной тягой выше, чем на участках эксплуатации РА-3. Однако прямое сравнение этих расходов для оценки энергоэффективности некорректно, так как на рассматриваемых неэлектрифицированных участках присутствуют разные эксплуатационные условия, определяющие указанный расход топлива. Таким образом, требуется соответствующее приведение значений этого расхода, компенсирующее разницу наиболее значимых факторов.

Сравнение энергозатрат при различных вариантах эксплуатации МВПС. В первом приближении выполним прямое сравнение энергозатрат самостоятельно движущегося электропоезда ЭС и дизель-поезда РА-3 для участков Москва — Волоколамск и Москва — Узловая, имеющих сопоставимые характеристики профиля пути и условия движения (табл. 3). Согласно табл. 4 значения среднего удельного расхода ТЭР для месяца с минимальным его значением $b_{\min}$ для этих участков составляют 190 кВт·ч/изм. и 57,6 кг/изм. соответственно. После перевода в единицы условного топлива получаем 23,3 кг у.т./изм. и 83,5 кг у.т./изм. соответственно. Полученная разница в 3,6 раза характеризует во многом разницу КПД. Это позволяет сделать в принципе очевидный вывод, что с энергетической точки зрения использование дизель-поезда РА-3 на электрифицированном участке Москва — Волоколамск невыгодно. Поскольку экономическая

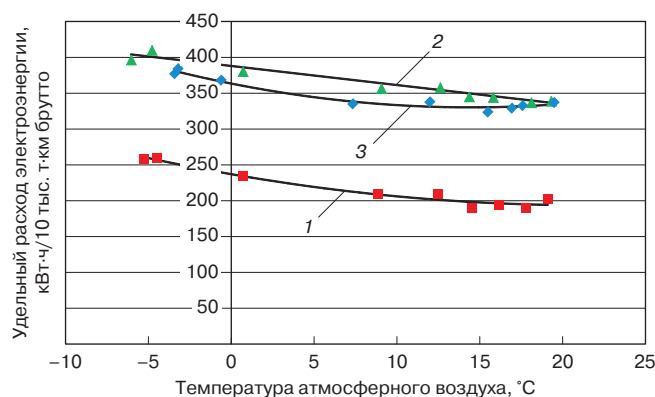


Рис. 1. Расход электроэнергии ЭС на тягу в зависимости от температуры за период январь—сентябрь 2023 г.: 1 — Москва—Волоколамск; 2 — Москва—Владимир; 3 — Санкт-Петербург — Бологое

Fig. 1. Electricity consumption by ES electric train for traction depending on temperature from January to September 2023: 1 — Moscow—Volokolamsk; 2 — Moscow—Vladimir; 3 — Saint Petersburg — Bologoye

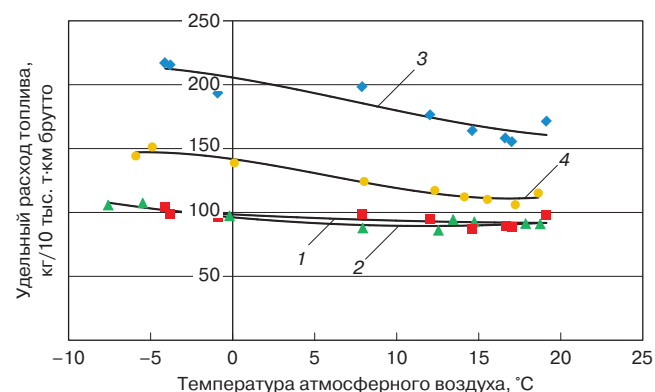


Рис. 2. Расход топлива ТЭП70БС на тягу ЭС в зависимости от температуры за период январь—сентябрь 2023 г.: 1 — Бологое — Старая Русса; 2 — Иваново — Владимир; 3 — Бологое — Валдай; 4 — Волоколамск — Муравьёво

Fig. 2. Fuel consumption by diesel locomotive TEP70BS for ES electric train traction depending on temperature from January to September 2023: 1 — Bologoye — Staraya Russa; 2 — Ivanovo — Vladimir; 3 — Bologoye — Valday; 4 — Volokolamsk — Murav'yovo

оценка, для которой важна также разность стоимостей дизельного топлива и электроэнергии и другие затраты, выходит за рамки настоящего исследования, дальнейшее сравнение энергозатрат будет осуществляться применительно к неэлектрифицированным участкам.

Параметрами расписания движения, которые будут определять разность энергозатрат, являются средняя техническая скорость и количество остановок.

Соответствующие показатели влияния и изменения удельного расхода ТЭР, позволяющие учесть разницу этих факторов для пассажирского поезда с локомотивной тягой, которым является ЭС, ведомый тепловозом ТЭП70БС, определим на основе [12].

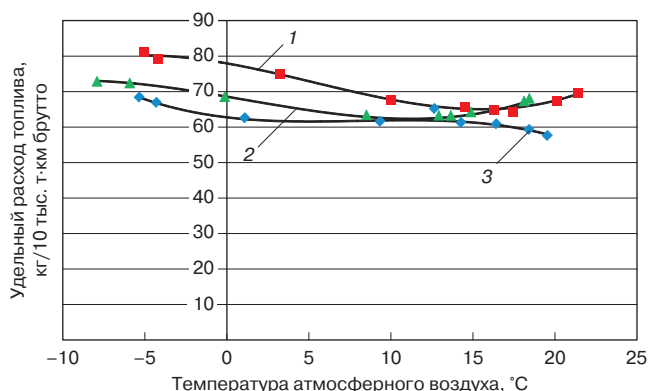


Рис. 3. Расход топлива РА-3 на тягу в зависимости от температуры за период январь–сентябрь 2023 г.: 1 — Курск — Воронеж; 2 — Кинешма — Иваново; 3 — Москва — Узловая

Fig. 3. Fuel consumption by diesel train RA-3 for traction depending on temperature from January to September 2023: 1 — Kursk — Voronezh; 2 — Kineshma — Ivanovo; 3 — Moscow — Uzlovaya

Показатель влияния средней технической скорости, (кг/изм.)/км/ч, определим по формуле

$$k_v = \frac{2,36}{\eta K_{\text{эф}}} (1 + \alpha_p) \frac{P_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} (b' + 2c'v_t) + \frac{2,36}{\eta K_{\text{эф}} q} \times \\ \times (b'' + 2c''v_t) - b_{\text{хв}} \frac{P_{\text{ср}}}{P_o} \frac{1}{v_t^2 Q_{\text{ср}}} \left(\frac{1}{K_{\text{уч}}} - 1 \right) 10^4 + \\ + \frac{9,1 \cdot 10^{-3} n_{\text{ост}}^{\text{уд}} 2v_t}{\eta K_{\text{эф}} L} \left(\frac{P_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} + 1 \right), \quad (1)$$

где η — паспортное значение КПД тепловоза; $K_{\text{эф}}$ — коэффициент энергетической эффективности; α_p — коэффициент одиночного прогона тепловоза; $P_{\text{ср}}$ — масса осредненного локомотива, т; $Q_{\text{ср}}$ — средняя масса поезда, т; b' и c' — коэффициенты при уравнении удельного сопротивления движению локомотива; v_t — средняя техническая скорость, км/ч; q — нагрузка на ось вагона, т; b'' и c'' — коэффициенты при уравнении

Таблица 4

Характеристики энергопотребления на отдельных участках эксплуатации поездов ЭС1 и РА-3 за период январь–сентябрь 2023 г.

Table 4

Characteristics of energy consumption at individual sections of operation of ES1 and RA-3 trains from January to September 2023

Параметр	Участок эксплуатации									
	Москва — Иваново		Санкт-Петербург — Валдай — Старая Русса			Москва — Муравьёво		Кинешма — Иваново	Курск 1 — Воронеж	Москва — Узловая
	Москва — Владимир	Владимир — Иваново	Санкт-Петербург — Бологое	Бологое — Валдай	Бологое — Валдай — Старая Русса	Москва — Волоколамск	Волоколамск — Муравьёво			
Средний расход ТЭР на поездку* для месяца с минимальным его значением B_{min}	3920 кВт·ч	730 кг	6300 кВт·ч	465 кг	915 кг	1480 кВт·ч	966 кг	194 кг	368 кг	322 кг
Коэффициент вариации расхода, %	7,3	12,5	5,5	6,9	7,1	11,3	10,9	7,2	9,0	16,8
Средний удельный расход ТЭР для месяца с минимальным его значением b_{min}	338 кВт·ч/изм.**	84,9 кг/изм.	330 кВт·ч/изм.	155 кг/изм.	89 кг/изм.	190 кВт·ч/изм.	106 кг/изм.	60,9 кг/изм.	63,4 кг/изм.	57,6 кг/изм.
Максимальная разница среднего расхода ТЭР за поездку* по месяцам ΔB	880 кВт·ч	190 кг	1020 кВт·ч	185 кг	155 кг	540 кВт·ч	411 кг	40 кг	104 кг	56 кг
Максимальный процент изменения удельного расхода ТЭР по месяцам $\Delta \bar{b}$	18	21	14	29	15	27	30	17	22	15

* В обе стороны.

** Здесь и далее изм. — измеритель перевозочной работы (10 тыс. т·км брутто).

удельного сопротивления движению вагонов; $b_{\text{ххх}}$ — часовой расход топлива при работе дизеля тепловоза на холостом ходу, кг/ч; P_o — масса локомотива, выполняющего основной объем перевозок на участке, т; $K_{\text{уч}}$ — коэффициент участковой скорости; $n_{\text{ост}}^{\text{уд}}$ — количество остановок, приходящихся на один поезд; L — длина расчетного участка, км.

Изменение удельного расхода топлива, определяемое разностью скоростей движения Δv_t , кг/изм.:

$$\Delta b_v = k_v \Delta v_t. \quad (2)$$

Показатель влияния количества остановок, (кг/изм.)/остановка [13]:

$$k_{n_{\text{ост}}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} v_t^2}{\eta K_{\text{эф}} L} \left(\frac{P_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} + 1 \right). \quad (3)$$

Изменение удельного расхода топлива, определяемое разностью количества остановок $\Delta n_{\text{ост}}$, кг/изм.:

$$\Delta b_{n_{\text{ост}}} = k_{n_{\text{ост}}} \Delta n_{\text{ост}}. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) позволяют привести удельный расход топлива тепловозом ТЭП70БС, осуществляющим тягу ЭС, к параметрам расписания на участках эксплуатации дизель-поезда РА-3 для сравнения с удельным расходом топлива последним. Хорошо известно, что на энергозатраты немалое влияние оказывают также характеристики профиля пути. Поскольку принятые при расчетах допущения позволяют получить больше качественную, нежели количественную оценку, с учетом отмеченного ранее отличия результатов на рис. 2 и 3, для сравнения отобраны пары участков с условием, что профиль участка эксплуатации ЭС с ТЭП70БС должен быть не сложнее профиля участка эксплуатации дизель-поезда РА-3. Таким образом, дизель-поезд РА-3 при сравнении окажется либо в сопоставимых, либо в худших условиях.

Общими для всех сравниваемых ниже вариантов будут следующие исходные данные, необходимые для вычислений по выражениям (1) и (3):

- $\eta = 0,3$; $P_{\text{ср}} = P_o = 135$ т; $b_{\text{ххх}} = 16,2$ кг/ч (по данным руководства по эксплуатации на тепловоз ТЭП70БС);

- $Q_{\text{ср}} = 300$ т (учетная масса ЭС, используемая при обработке маршрутов машиниста), соответственно, с учетом количества осей у ЭС, $q = 15$ т/ось;

- $b' = 0,11$; $c' = 0,0023$ (по данным ПТР³);

- $b'' = 0,0605$; $c'' = 0,00284$ (получено на основе данных ООО «Уральские локомотивы»).

Значения α_p и $K_{\text{эф}}$ с учетом имеющихся исходных данных в расчетах приняты равными 1, значения $n_{\text{ост}}^{\text{уд}}$ и L приведены в табл. 3.

Значения $K_{\text{уч}}$ получены из расписания и составляют для участков Владимир—Иваново и Бологое—Валдай — 0,96, для участка Бологое—Старая Русса — 0,92 и для участка Волоколамск—Муравьёво — 0,88.

Пары участков, для которых выполнено сравнение удельного расхода топлива с учетом его приведения, указаны в табл. 5. В этой же таблице приведены рассчитанные значения показателей влияния, разности учитываемых факторов и соответствующие изменения удельного расхода топлива.

С использованием данных табл. 5 можно определить, что удельный расход топлива $b_{\text{мин}}$ на участке Владимир—Иваново (см. табл. 4), скорректированный на меньшую скорость и большее количество остановок, соответствующих участку Курск 1—Воронеж, составит $84,9 - 17,8 + 8,4 = 75,5$ кг/изм. Вычтем из этой величины дополнительный расход, определяемый простым ТЭП70БС с ЭС при обороте на участке Владимир—Иваново (в среднем — 2 ч) — $6,5$ кг/изм., в результате получим 69 кг/изм. При этом значение $b_{\text{мин}}$ на участке Курск 1—Воронеж равно $63,4$ кг/изм., т. е. на $8,1\%$ ниже. Как видим, отличие значимое, и это без учета более сложного профиля пути (см. табл. 3) на участке Курск 1—Воронеж.

Схожий с участком Бологое—Валдай профиль пути присутствует на участке Кинешма—Иваново (для данного участка отобраны маршруты машиниста только поездов-экспрессов). Значение $b_{\text{мин}}$ на участке Бологое—Валдай, скорректированное на меньшую скорость и большее количество остановок, соответствующих участку Кинешма—Иваново, составит $155 - 17,8 + 10,6 = 147,8$ кг/изм. Также надо учесть, что у ТЭП70БС, задействованных для тяги ЭС на участке Бологое—Валдай, присутствует $7,5$ ч простоя, из них около 6 ч совместно с ЭС. В последнем случае расход топлива выше за счет обеспечения электропитания ЭС. В среднем для данного участка за счет указанного простоя удельный расход топлива, при довольно малой перевозочной работе, увеличивается на 70 кг/изм. Соответственно, разница с $b_{\text{мин}}$ на участке Кинешма—Иваново ($60,9$ кг/изм.) составляет 22% . Как видим, местные условия обслуживания поездов существенно влияют на уровень энергозатрат.

Учитывая меньшее время простоя ТЭП70БС при эксплуатации на участке Бологое—Старая Русса (в среднем — $3,5$ ч, из них с ЭС — около 2 ч.), также произведено сравнение затрат топлива на этом участке и участке Кинешма—Иваново. Значение $b_{\text{мин}}$ на участке Бологое—Старая Русса, скорректированное на меньшую скорость и меньшее количество остановок, соответствующих участку Кинешма—Иваново, составит $89 - 13,2 - 0,8 = 75$ кг/изм. Вычтем из этой

³Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 516 с.

Таблица 5

Расчетные параметры приведения расхода топлива для сравниваемых участков

Table 5

Estimated fuel consumption conversion parameters for the compared sections

Участок эксплуатации ЭС с ТЭП70БС	Участок эксплуатации РА-3	k_{ν} , (кг/изм.)/км/ч	Δv_{τ} , км/ч	Δb_{ν} , кг/изм.	$k_{n_{ост}}$, (кг/изм.)/ост-ка	$\Delta n_{ост}$, ед.	$\Delta b_{n_{ост}}$, кг/изм.
Владимир — Иваново	Курск 1 — Воронеж	2,227	–8	–17,8	2,1	+4	+ 8,4
Бологое — Валдай	Кинешма — Иваново	1,782	–10	–17,8	2,66	+4	+ 10,6
Бологое — Старая Русса	Кинешма — Иваново	1,655	–8	– 13,2	0,773	–1	–0,8
Волоколамск — Муравьёво	Москва — Узловая	1,705	–1,3	– 2,2	1,525	–2	–3,0

величины также средний расход на простой на участке Бологое — Старая Русса — 8,5 кг/изм. Полученное значение 66,5 кг/изм. на 8,4 % выше среднего удельного расхода топлива на участке Кинешма — Иваново.

На участке Волоколамск — Муравьёво отмечен расход b_{min} , равный 106 кг/изм. при средней скорости движения 65 км/ч. В среднем около 15 кг/изм. из этого расхода определяется наличием 4,5 ч. простоя ТЭП70БС, из которых 2 ч — с электропоездом ЭС. Значение b_{min} на участке Волоколамск — Муравьёво с вычетом составляющей на простой и скорректированное на меньшую скорость и меньшее количество остановок, соответствующих участку Москва — Узловая, составит $106 - 15 - 2,2 - 3,0 = 85,8$ кг/изм. Полученное значение по сравнению с удельным расходом на участке Москва — Узловая (57,6 кг/изм.) выше на 33 %.

Во всех сравниваемых случаях удельный расход топлива ТЭП70БС с электропоездом ЭС, приведенный к условиям движения на участках эксплуатации дизель-поезда РА-3, оказался больше, чем удельный расход топлива последним. Учитывая принятые допущения в расчетах, а также существенный разброс расхода топлива в маршрутах машиниста (табл. 4), характеризуемый коэффициентом вариации и определяемый

в том числе и фактором ручной фиксации показаний приборов учета, для предварительной оценки будем ориентироваться на минимальное значение разницы из полученных выше значений, т. е. 8,1 %. Получение более точных количественных оценок, в зависимости от степени актуальности настоящих исследований, потребует обработки данных от бортовых систем регистрации, а при их отсутствии — организации опытных поездок в сопоставимых условиях.

Конструктивные особенности дизель-поезда РА-3 в части энергоэффективности и сопоставления с электропоездом ЭС. Энергетическая эффективность дизель-поезда РА-3 в эксплуатации, как и любой серии тягового подвижного состава, связана с рядом конструктивных особенностей. Отличительной особенностью дизель-поезда РА-3 в части системы поддержания микроклимата в пассажирских салонах является комбинированный способ их отопления — с использованием теплоты системы охлаждения дизеля и системы его предпускового прогрева, а также электрических калориферов, получающих питание от специального генератора, номинальная мощность которого с учетом потерь в его гидроприводе составляет около 24 % мощности дизеля. Эффективность такого способа выше, чем полностью электрического отопления, но ниже, чем отопления с использованием только тепла от системы охлаждения дизеля [13, 14].

На рис. 3 показано, что режимы эксплуатации системы поддержания микроклимата для участков эксплуатации РА-3 отличаются, что связано в том числе и с населенностью поезда. Управление системой микроклимата после того, как оно включено на пульте машиниста, — автоматическое и корректируется в том числе по сигналу от системы пневматического подвешивания, пропорционального количеству пассажиров.

Сочетание принятой максимальной скорости РА-3 и гидравлической передачи мощности, включающей два гидроаппарата, определяет довольно высокую скорость перехода с режима гидротрансформатора на режим гидромукты при номинальном режиме работы дизеля (рис. 4). При частичных положениях органа

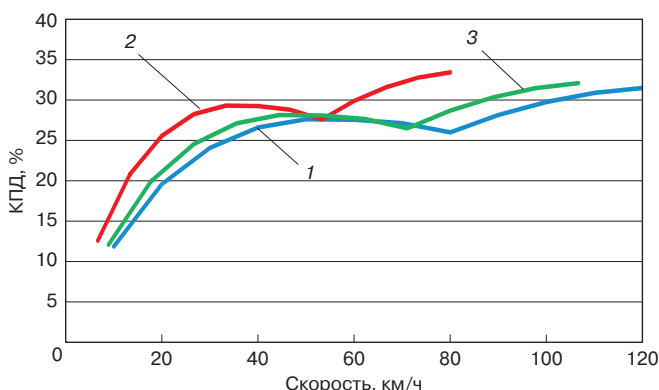


Рис. 4. Зависимость КПД дизель-поезда РА-3 от скорости: 1 — внешняя; 2 — 30 % мощности; 3 — 70 % мощности

Fig. 4. Dependence of RA-3 diesel train efficiency on speed: 1 — external; 2 — 30 % of power; 3 — 70 % of power

Таблица 6

Сравнительные технические характеристики электропоездов типа ЭС
(автономный и ведомый варианты) и дизель-поезда РА-3

Table 6

Comparative technical characteristics of ES electric trains
(autonomous and driven variants) and diesel train RA-3

Техническая характеристика	ЭС	ЭС с тепловозом ТЭП70БС	РА-3
Основная составность, вагонов	5	5	2, 3 (4–6 по СМЕ*)
Тяговая мощность, кВт	2550	2670 без СЭС 2040 с СЭС	При 2–3 вагонах — 505 (720 по дизелю) При работе по СМЕ* — 1010 (1440 по дизелю)
Разгонное ускорение, м/с ²	0,64	0,29	0,37 (4 вагона) 0,25 (6 вагонов)
Максимальная скорость движения, км/ч	160	160**	120
Число сидячих мест, ед.			
2 вагона	—	—	145
3 вагона	—	—	241
4 вагона	—	—	290
5 вагонов	443	443	—
6 вагонов	—	—	482
Наличие системы кондиционирования в салонах	да	да	да

* СМЕ — система многих единиц. Способ управления подвижным составом, при котором в один поезд сцепляется несколько локомотивов или моторных вагонов, а управление двигателями ведется с одного поста управления и одной локомотивной бригадой.

** Для тяги ЭС используют модификацию ТЭП70БС с максимальной скоростью 160 км/ч.

управления топливоподачей, учитывая мало меняющийся от мощности удельный эффективный расход топлива используемого дизеля, характеристика КПД будет практически пропорционально сдвигаться в сторону меньших скоростей. Но упомянутый выше довольно существенный процент отбора мощности дизеля на генератор собственных нужд при средних скоростях, отмеченных на участках эксплуатации РА-3 (табл. 3), может приводить к необходимости движения в режиме гидротрансформатора, имеющего более низкий КПД, чем гидромuftа. Поэтому топливная экономичность РА-3 будет определяться соответствием выбранного режима управления дизелем и текущей скорости движения на том или ином участке пути с учетом его профиля, а также с учетом населенности поезда.

Несмотря на то, что в бортовой системе управления РА-3 реализована функция поддержания заданной машинистом скорости с автоматическим отключением при снижении скорости более 10 км/ч от заданной, наличие качественных режимных карт и мастерство машиниста оказывают немалое влияние на расход топлива в эксплуатации. Косвенно это подтверждает фактический разброс данной величины, характеризуемый коэффициентом вариации (табл. 4), который составляет от 7,2 % на участке Кинешма—Иваново до 16,8 % на участке Москва—Узловая.

Для возможности сопоставления вариантов по табл. 2 дополнительно приведем сравнительные характеристики ЭС и РА-3, определяющие их эксплуатационные возможности. В табл. 6 приведены данные о вариантах составности, тяговой мощности, разгонном ускорении и пассажироместности.

Из табл. 6 видно, что РА-3 может обеспечить сопоставимое с участками эксплуатации электропоездов ЭС при их тяге ТЭП70БС разгонное ускорение, но меньшую максимальную скорость, что связано с меньшей тяговой мощностью. Также данные табл. 6 показывают, что РА-3 в шестивагонной составности сопоставим по вместимости с ЭС. Следует отметить, что среди тех участков эксплуатации РА-3, данные по которым были обработаны (табл. 3), шестивагонная составность эпизодически используется на участке Кинешма—Иваново. По предварительной оценке, удельный расход топлива по сравнению с основной используемой трехвагонной составностью меньше, и разница составляет около 10 %. При накоплении статистики для поездок шестивагонного РА-3 может быть получена более точная оценка, но тенденция должна сохраниться, так как при увеличении количества вагонов в большей степени может быть использована инерция поезда. Отдельно следует указать, что РА-3, в отличие от ЭС, допускает оперативное уменьшение составности, что при снижении пассажиропотока является одним из важных путей экономии топлива.

Таблица 7

Результаты расчетов затрат топлива на питание собственных нужд ЭС от тепловоза ТЭП70БС

Table 7

Calculation results of fuel consumption for power supply of auxiliary needs of ES from diesel locomotive TEP70BS

Составляющая	Затраты на собственные нужды ЭС*	Затраты на отопление		Итого	
		Режим 50 %	Режим 100 %	Режим с отоплением 50 %	Режим с отоплением 100 %
Мощность, кВт	30	157	315	187	345
Расчетный часовой расход топлива b_p , кг/ч	7,3	38	76,2	45,2	83,5

* Без учета систем обеспечения микроклимата и охлаждения неактивного тягового электрооборудования.

Сравнение достигнутых энергозатрат на соблюдение микроклимата при различных вариантах эксплуатации МВПС. Как указано выше, в табл. 4 приведены величины, характеризующие разницу максимального и минимального значений среднего за календарный месяц уровня энергозатрат. Это разница среднего расхода ТЭР на поездку ΔB и изменение удельного расхода ТЭР $\Delta \bar{b}$. Как видим, значения этих величин широко варьируются на рассмотренных участках. Например, для электрической тяги $\Delta \bar{b}$ находится в диапазоне от 14 % (участок Санкт-Петербург — Бологое) до 27 % (участок Москва — Волоколамск). Близкое к участку Санкт-Петербург — Бологое значение $\Delta \bar{b}$ отмечено на участке Москва — Владимир и составляет 18 %. В данном случае можно отметить влияние скорости на рассматриваемую величину: с увеличением скорости $\Delta \bar{b}$ снижается, что может быть объяснено соответствующим снижением доли влияния фактора температуры в общих энергозатратах. Для дизельной тяги разброс $\Delta \bar{b}$ составляет от 15 до 30 % для ТЭП70БС и от 15 до 22 % для РА-3.

В части ТЭП70БС тенденция снижения $\Delta \bar{b}$ при увеличении средней скорости движения сохраняется для всех участков, кроме Бологое — Старая Русса. На данном участке это, вероятно, связано с невысокой населенностью поезда и меньшей степенью использования системы поддержания микроклимата. Для РА-3 однозначной зависимости $\Delta \bar{b}$ от скорости не прослеживается, что может быть объяснено дополнительным влиянием различия в составности поездов, их населенности и разными диапазонами изменения температуры, что видно из рис. 3.

Как ранее указано, значение $\Delta \bar{b}$ в наибольшей степени должно определяться отличиями в режиме работы системы обеспечения микроклимата.

С целью дополнительной проверки достигнутых значений затрат топлива на соблюдение микроклимата определим расчетный часовой расход топлива ТЭП70БС, связанный с электроснабжением собственных нужд ЭС, включая систему микроклимата, по формуле

$$b_p = \frac{N_p \cdot 3600}{\eta_{дгв} H_t}, \quad (5)$$

где N_p — вырабатываемая электрическая мощность, кВт; $\eta_{дгв}$ — КПД дизель-генератора; H_t — низшая теплотворная способность дизельного топлива, принята в расчетах 42 500 кДж/кг.

Данные [7] по расходу топлива на отопление ТЭП70БС показывают, что $\eta_{дгв}$ на позициях контроллера, начиная с седьмой, составляет 35 % и более, при расчетах по формуле (5) принимаем $\eta_{дгв}$, равным этому значению. Мощность отопления с учетом особенностей системы регулирования ЭС принята по двум вариантам — 50 и 100 %. Результаты расчетов сведены в табл. 7.

Сопоставим данные табл. 7 со значением часового расхода топлива $b_{\text{ч}}$, равного отношению значения ΔB (табл. 4) ко времени поездки. Для участка Владимир — Иваново $b_{\text{ч}}$ равно 36,8 кг/ч, что не противоречит значениям b_p и соответствует частичному режиму работы системы отопления (меньше 50% мощности).

Сравним энергозатраты на поддержание микроклимата для вариантов ЭС+ТЭП70БС и РА-3. Очевидно, что такое сравнение допустимо выполнять только в сопоставимых температурных условиях. С точки зрения таких условий среди рассматриваемых участков наиболее близкими являются участки Владимир — Иваново и Кинешма — Иваново, в том числе благодаря совпадению одной из станций, ограничивающей участки. Для участка Кинешма — Иваново максимальное значение удельного расхода ТЭР отмечено в январе 2023 г., а минимальное — в сентябре 2023 г.

Среднемесячные значения температуры атмосферного воздуха в январе 2023 г. на метеостанциях, расположенных по границам данных участков, составили на метеостанции Иваново — минус 7,6 °С, на метеостанции Владимир — минус 7,5 °С, на метеостанции Кинешма — минус 8,3 °С. Аналогичные значения в сентябре — 13,4; 13,7 и 13,9 °С соответственно. На рис. 5 приведено распределение среднесуточных значений температур в январе 2023 г., а на рис. 6 — аналогичное

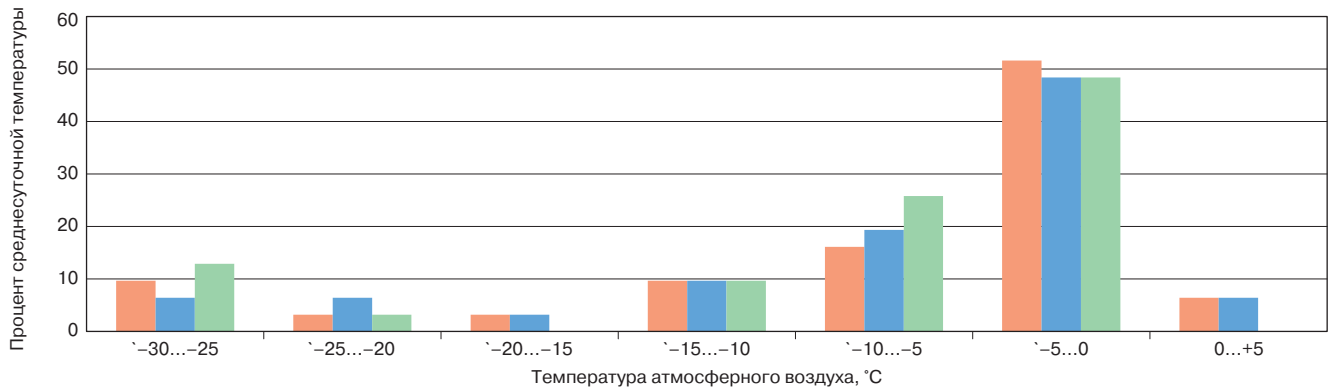


Рис. 5. Распределение значений среднесуточных температур в январе 2023 г.:

— Иваново; — Владимир; — Кинешма

Fig. 5. Distribution of average daily temperatures in January 2023:

— Ivanovo; — Vladimir; — Kineshma

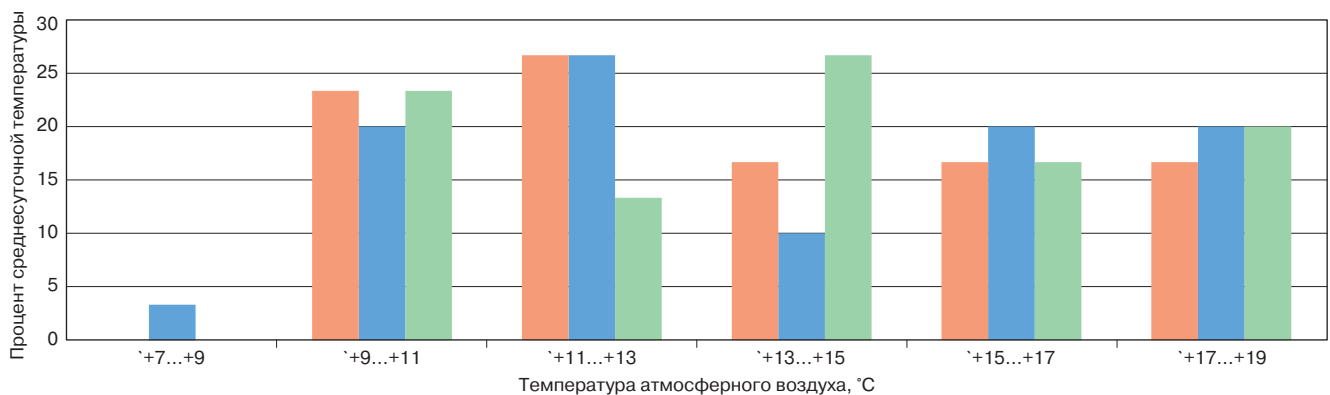


Рис. 6. Распределение значений среднесуточных температур в сентябре 2023 г.:

— Иваново; — Владимир; — Кинешма

Fig. 6. Distribution of average daily temperatures in September 2023:

— Ivanovo; — Vladimir; — Kineshma

распределение в сентябре 2023 г. Как видим, и средние значения температур, и их распределения вполне сопоставимы друг с другом.

Дополнительный часовой расход $b_{\text{ч}}$ составил для участка Кинешма — Иваново 11,1 кг/ч. Поскольку это значение соответствует составности, равной трем вагонам (табл. 3), для корректного сравнения с результатом на участке Владимир — Иваново необходимо пропорционально увеличить его до значения, соответствующего составности, равной шести вагонам, сопоставимой, как ранее указано, по расчетной населенности с ЭС, т. е. до 22,2 кг/ч. Отметим, что приведенное в табл. 4 значение ΔB для участка Владимир — Иваново соответствует другим месяцам года — февралю и марту, так как расход ТЭР определяется влиянием и других факторов.

Значение ΔB на участке Владимир — Иваново, определенное для месяцев, аналогичных использовавшимся при расчете ΔB на участке Кинешма — Иваново, составляет 95 кг, что соответствует $\Delta b_{\text{ч}} = 30,1$ кг/ч. Отличие от ранее определенной $\Delta b_{\text{ч}}$

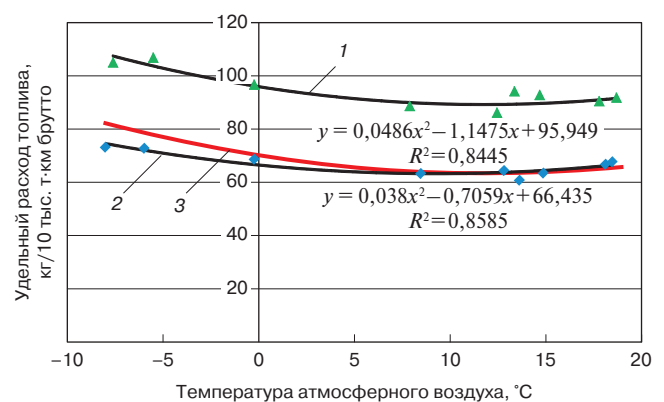


Рис. 7. Регрессионные зависимости удельного расхода топлива от температуры по данным за период январь–сентябрь 2023 г.:

1 — Владимир — Иваново; 2 — Кинешма — Иваново; 3 — Владимир — Иваново (с приведением вершины параболы к Кинешма — Иваново)

Fig. 7. Regression dependences of specific fuel consumption on temperature based on the data from January to September 2023:

1 — Vladimir — Ivanovo; 2 — Kineshma — Ivanovo; 3 — Vladimir — Ivanovo (bringing the parabola vertex to Kineshma — Ivanovo)

для участка Кинешма — Иваново составляет 26,2 %. Поскольку эта разница в точке, дополнительно на рис. 7 приведены построенные по опытным точкам регрессионные зависимости удельного расхода топлива от температуры для участков Владимир — Иваново и Кинешма — Иваново, а также кривая, соответствующая регрессионной зависимости для участка Владимир — Иваново, смещенная к вершине регрессионной зависимости для участка Кинешма — Иваново.

Из рис. 7 видно, что линия зависимости удельного расхода топлива для ТЭП70БС + ЭС в зоне отрицательных температур, т. е. при гарантированно включенном отоплении, возрастает более интенсивно, чем зависимость для РА-3. Разность удельных расходов топлива для средней температуры января 2023 г. на рассматриваемых участках — минус 7,5 °С, определенная по приведенным на графике регрессионным уравнениям, составляет 7,4 кг/10 тыс. т·км брутто, или 9,1 %.

Обсуждение и заключение. Сопоставление данных табл. 3 и 5 позволяет сделать вывод, что использование РА-3 на участке Владимир — Иваново при существующем расписании по его скоростным характеристикам невозможно, а на участках Волоколамск — Муравьёво, Бологое — Валдай — Старая Русса вполне допустимо (вариант 2 табл. 2), при этом может потребоваться шестивагонное исполнение РА-3. Характеристики участка и расписание позволяют использовать РА-3 и на участке Москва — Волоколамск, т. е. на всем маршруте Москва — Муравьёво (вариант 3 табл. 2), но этот вариант не является перспективным с точки зрения экономии энергоресурсов.

Что касается варианта 4 табл. 2, то по скоростным параметрам расписания и пробегу он может быть перспективным для участка Москва — Иваново из-за наличия не сложного профиля пути, сопоставимого с участками Калининградской железной дороги, для которой был предложен ЭС с накопителями [10]. Для участка Москва — Муравьёво, имеющего более сложный профиль пути, требуются дополнительные расчеты по уточнению характеристик накопителей и обоснованию реализации такого проекта.

Известно, что выпуск РА-3 из-за отсутствия поставок импортных комплектующих с 2023 г. прекращен [15]. Однако отечественные ученые предлагают альтернативные варианты [16], которые машиностроители и эксплуатирующие РА-3 компании со временем смогут принять на вооружение, так как в будущем полигоны эксплуатации РА-3 (или их модификаций) неизбежно будут расширяться, в том числе и для постепенной замены выработавших ресурс более ранних серий — РА-2. С учетом экологических требований наиболее предпочтительным является вариант эксплуатации ЭС с накопителями, но этот вариант требует значительных

капитальных вложений и может рассматриваться в долгосрочной перспективе при выполнении технико-экономического обоснования для конкретных участков эксплуатации.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Отсутствие в наличном парке отечественных перевозчиков дизельного МВПС с максимальной скоростью выше 120 км/ч делает безальтернативным использование для скоростных межрегиональных экспрессов на маршрутах, включающих как электрифицированные, так и неэлектрифицированные участки, тягу скоростных электропоездов ЭС с помощью пассажирского тепловоза ТЭП70БС. Расчетные затраты на обеспечение системы микроклимата ЭС при этом могут превышать 80 кг/ч. Перспектива создания для данных маршрутов ЭС с возможностью автономного хода требует проведения технико-экономических расчетов с целью обоснования этого проекта.

2. Для межрегиональных экспрессов, в расписании которых заложена средняя скорость до 90 км/ч, использование ТЭП70БС для тяги ЭС по энергозатратам менее выгодно, чем использование дизель-поезда РА-3. Из существующих участков обслуживания возможно использование РА-3 в шестивагонном исполнении на маршрутах Волоколамск — Муравьёво и Бологое — Валдай — Старая Русса. Экономия удельного расхода топлива на тягу по предварительной оценке может составить около 8 %, на отопление — в зависимости от погодных условий; для средних значений 9 месяцев 2023 г. — около 9 %. Дополнительным резервом экономии при этом будет возможность оперативного изменения составности РА-3, отсутствующая у ЭС, которая позволит учесть неравномерность пассажиропотока во времени.

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. Руднев В. С., Маношин А. В. Как повысить эффективность дизельной тяги в пригородном сообщении // Локомотив. 2011. № 6 (654). С. 31–34 [Rudnev V. S., Manoshin A. V. How to improve diesel traction on suburban routes. *Lokomotiv*. 2011;(6):31-34. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/nyelyx>.

2. Аникиев И. П., Ляшенко А. С., Носков М. Ю. Будущее дизель-поездов в России // Локомотив. 2003. № 5. С. 21–22 [Anikiev I. P., Lyashenko A. S., Noskov M. Yu. Future diesel trains in Russia. *Lokomotiv*. 2003;(5):21-22. (In Russ.)].
3. Знакомьтесь: Тепловоз ТЭП70БС нового исполнения / С. И. Ким [и др.] // Локомотив. 2019. № 7 (751). С. 39–42 [Kim S. I., Pronin A. A., Aksenyuk A. A., Bychkov A. V. Please, meet: ТЕР70BS diesel locomotive of new configuration. *Lokomotiv*. 2019;(7):39-42. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/qbgzjc>.
4. Рудов П. К. Улучшение продольной динамики дизель-поезда ДДБ1 при торможении // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2007. № 1–2 (14–15). С. 129–132 [Rudov P. K. Improvement of DDBL diesel train longitudinal dynamics under braking. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2007;(1-2):129-132. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ydsdprj>.
5. Создан вагон-электростанция для обеспечения движения поездов на неэлектрифицированных участках железных дорог (новости Трансмашхолдинга) // Локомотив. 2022. № 5. С. 36 [Power station carriage created to support train traffic on non-electrified railway sections (Transmashholding news). *Lokomotiv*. 2022;(5):36. (In Russ.)].
6. Аникиев И. П., Корнев А. Н. Электрическое отопление пассажирских вагонов от тепловоза ТЭП70БС // Локомотив. 2008. № 10. С. 33–34 [Anikiev I. P., Kornev A. N. Electric heating of passenger cars from ТЕР70BS diesel locomotive. *Lokomotiv*. 2008;(10):33-34. (In Russ.)].
7. Коссов Е. Е., Азаренко В. А., Ляшенко А. С. Сравнение расходов топлива при включении генератора отопления на различных позициях контроллера машиниста // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1999. № 2. С. 21–24 [Kossov E. E., Azarenko V. A., Lyashenko A. S. Comparison of fuel consumption when switching on heating generator on different notches of driver's controller. *Russian Railway Science Journal*. 1999;(2):21-24. (In Russ.)].
8. Повышение эффективности использования мощности энергетической установки тепловоза с системой энергоснабжения поезда / А. С. Ляшенко [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2000. № 1. С. 25–27 [Lyashenko A. S., Kossov E. E., Kornev A. N., Azarenko V. A., Loginova E. Yu. Raising of operating efficiency of diesel locomotive power unit with system of train electric supply. *Russian Railway Science Journal*. 2000;(1):25-27. (In Russ.)].
9. Стоякин Г. М., Костин А. В., Науменко С. Н. Использование теплоты отработавших газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 240–246 [Stoyakin G. M., Kostin A. V., Naumenko S. N. Use of diesel engine exhaust gas heat for heating passenger cars. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):240-246. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-240-246>.
10. Быстранов В. Е., Семёнов И. В., Железнов С. В. Перспективы применения контактно-аккумуляторных поездов в России // Локомотив. 2022. № 3 (783). С. 9–13 [Bystranov V. E., Semenov I. V., Zheleznov S. V. Prospects for the use of contact accumulator trains in Russia. *Lokomotiv*. 2022;(3):9-13. (In Russ.)].
11. Баранов А. М., Козлов В. Е., Фельдман Э. Д. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий. М.: Транспорт, 1964. 196 с. (Труды ВНИИЖТ; вып. 280) [Baranov A. M., Kozlov V. E., Feldman E. D. *Development of the throughput and carrying capacity of singletrack lines*. Moscow: Transport Publ.; 1964. 196 p. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 280). (In Russ.)].
12. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с. [Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A., Popov K. M., Shkol'nikov E. N. *Modern methodology of technical regulation of the consumption of fuel and energy resources by locomotives for train traction*. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. 144 p. (In Russ.)].
13. Вольперт А. Г. Пригородные и региональные перевозки. Каким дизельным подвижным составом их выполнять // Железнодорожный транспорт. 1997. № 2. С. 39–43 [Volpert A. G. Diesel rolling stock for suburban and regional transport. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1997;(2):39-43. (In Russ.)].
14. Вольперт А. Г. Повышение топливной экономичности автомоторис и дизель-поездов // Железнодорожный транспорт. 1999. № 11. С. 68–71 [Volpert A. G. Improvement of fuel efficiency of motorailers and diesel trains. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1999;(11):68-71. (In Russ.)].
15. Статистика // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2023. № 4(64). С. 62–68 [Statistics. *Vestnik Instituta problem yestestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2023;(4):62-68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/mvdzmmh>.
16. Руднев В. С. Отечественная силовая установка для рельсового автобуса // Локомотив. 2023. № 6 (798). С. 33–36 [Rudnev V. S. Domestic power plant for rail buses. *Lokomotiv*. 2023;(6):33-36. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ubyive>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирилл Михайлович ПОПОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НЦ «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirill M. POPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024, первая рецензия получена 29.01.2024, вторая рецензия получена 02.02.2024, принята к публикации 07.02.2024.

The article was submitted 12.01.2024, first review received 29.01.2024, second review received 02.02.2024, accepted for publication 07.02.2024.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.027.2:625.032.3

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

Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей

А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения задач динамики рельсовых экипажей необходимо задать кинематическое возмущение их колебаний, в качестве которого используют эквивалентные вертикальные и горизонтальные геометрические неровности левого и правого рельсов. Для формирования такого четырехмерного возмущения выполняют генерацию реализаций многомерного случайного процесса, на основе авто- и взаимных корреляционных функций или спектральных и взаимных спектральных плотностей реальных записей неровностей рельсового пути. Работа посвящена уточнению вероятностных характеристик возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей, и разработке нового, упрощенного метода их генерации.

Материалы и методы. В работе выполнены вероятностный анализ длительных (свыше 14 км) записей натурных неровностей рельсового пути и аппроксимация полученных вероятностных характеристик аналитическими выражениями, соответствующими дифференцируемым случайным процессам. Параметры этих процессов найдены методом наименьших квадратов. Новым способом реализована генерация случайного процесса неровностей для координаты пути с помощью многомерного формирующего фильтра, импульсные характеристики которого найдены по аналитическим выражениям авто- и взаимных корреляционных функций.

Результаты. Были получены уточненные значения параметров вероятностных характеристик неровностей рельсового пути, которые могут быть использованы для задания возмущений колебаний рельсовых экипажей при решении задач динамики. Предложен упрощенный метод генерации неровностей для аргумента координаты пути, который обеспечивает высокую сходимость с данными, полученными ранее.

Обсуждение и заключение. Полученные вероятностные характеристики могут быть использованы для генерации многомерного случайного процесса неровностей при исследовании колебаний различных типов рельсовых экипажей, возникающих при их движении с различными скоростями. Предложенный упрощенный метод генерации позволяет сократить время, затраченное на задание возмущений при моделировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамика рельсовых экипажей, кинематическое возмущение, геометрические неровности рельсов, корреляционные функции, спектральные плотности, аппроксимация вероятностных характеристик, генерация случайных процессов возмущения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Генерирование геометрических неровностей как случайных возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 24–39.

Original article

UDK 629.4.027.2:625.032.3

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



Generation of geometric irregularities as random disturbances causing rail cab oscillations

Anatoliy N. Savoskin, Nataliya S. Lavlinskaya✉

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Solving the dynamics problems of rail cabs requires specifying the kinematic disturbance of their oscillations represented through equivalent vertical and horizontal geometric irregularities of the left and right rails. The formation of such four-dimensional disturbance involves the generation of multivariate random processes based on auto- and cross-correlation functions or spectral and cross-spectral densities of actual recordings of rail track irregularities. The paper refines the probabilistic properties of the disturbances that cause rail cab oscillations and develops a new simplified method for their generation.

Materials and methods. The paper provides a probabilistic analysis of long-term (over 14 km) recorded natural rail track irregularities and an approximation of the obtained probabilistic properties with analytical expressions corresponding to differentiable random processes. The parameters of these processes were found by the least-square method. The new method generated random irregularities for the track coordinate using a multivariate shaping filter whose impulse characteristics were found with analytical expressions of auto- and cross-correlation functions.

Results. The authors refined the probabilistic values of rail track irregularities that may be used to specify disturbances of rail cab oscillations when solving dynamics problems and proposed a simplified irregularity generation method for the track coordinate argument that provides high convergence to the previously obtained data.

Discussion and conclusion. The received probabilistic characteristics may be applied to generate a multivariate random irregularities when examining the oscillations of different type rail cabs occurring at different speeds movement. The proposed simplified generation method reduces the time for simulating disturbances.

KEYWORDS: rail cab dynamics, kinematic disturbance, geometric rail irregularities, correlation functions, spectral densities, approximation of probabilistic characteristics, generation of random disturbance processes

FOR CITATION: Savoskin A. N., Lavlinskaya N. S. Generation of geometric irregularities as random disturbances causing rail cab oscillations. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):24-39. (In Russ.).

Введение. Для решения задач динамики рельсовых экипажей возникает необходимость задания кинематического возмущения колебаний в виде четырехмерного случайного процесса $\|\eta_{i,j}(x=vt)\|$ эквивалентных вертикальных и горизонтальных геометрических неровностей левого и правого рельсов (η — неровность, x — координата пути, v — скорость движения, t — время).

Первые предложения по использованию геометрической неровности рельсов в качестве возмущения, вызывающего колебания экипажей, были сделаны в 1960-х гг. в ЦНИИ МПС (ВНИИЖТ) канд. техн. наук Н. Н. Кудрявцевым [1]. Он предложил использовать в качестве такого возмущения детерминированные усредненные геометрические неровности, обусловленные просадкой стыков:

- одnogорбые неровности на длине рельсового звена $L_{зв} = 25$ м:

$$\eta(t=x/v)=\eta_m(1-\cos\omega t)=\eta_m\left(1-\cos 2\pi\frac{v}{L_{зв}}t\right),$$

где η_m — амплитуда неровности (принималась равной $3\div 5$ мм для пути в хорошем состоянии и $8\div 10$ мм для пути в плохом состоянии);

- двугорбые неровности на длине рельсового звена $L_{зв} = 25$ м:

$$\begin{aligned}\eta(t) &= \eta_{m1}\left(1-\cos\omega t - \frac{\eta_{m2}}{\eta_{m1}}\cos 2\omega t\right) = \\ &= \eta_m\left(1-\cos 2\pi\frac{v}{L_{зв}}t - \frac{\eta_{m2}}{\eta_{m1}}\cos 4\pi\frac{v}{L_{зв}}t\right),\end{aligned}$$

где η_{m1} и η_{m2} — амплитуды одnogорбых и двугорбых неровностей, причем можно принять, что $\eta_{m2} = 0,2\eta_{m1}$.

Впоследствии использовались не только двугорбые, но и трехгорбые неровности.

Применение таких возмущений позволило выполнять расчеты колебаний рельсовых экипажей на появившихся в то время аналоговых вычислительных машинах, а позднее и на цифровых. Однако использование таких усредненных неровностей в качестве возмущений не гарантировало сходимости результатов расчета и эксперимента. Например, записи колебаний электровагона ВЛ80 при движении со скоростью 100 км/ч (рис. 1) наглядно показывают, что процессы колебаний рельсовых экипажей при движении по рельсовому пути имеют явно выраженный случайный характер. Поэтому применение детерминированных усредненных геометрических неровностей в качестве

возмущения не обеспечивает адекватность полученных решений и нецелесообразно.

Новые предложения по применению в качестве возмущений геометрических неровностей пути для моделирования динамической системы «экипаж — путь» были сделаны А. Я. Коганом на основе измерений геометрии ненагруженного пути [2]. Результаты этих измерений обобщены в РД 32.68–96, где рекомендованы аналитические выражения спектральных плотностей геометрических неровностей для диапазонов частот 0–10 и 10–100 Гц¹. При этом не учитывались взаимосвязи между неровностями левого и правого рельсов, которые определяются взаимными спектральными плотностями. Кроме того, применение данных рекомендаций² требует использования модели «экипаж — путь», в которой путь должен быть представлен в виде системы с распределенными параметрами: погонной массой, жесткостью и затуханием. Такая модель уточняет поведение исследуемой системы «экипаж — путь» в диапазоне частот свыше 30 Гц для пути на деревянных шпалах и свыше 100 Гц для пути на железобетонных шпалах. Однако диапазон частот колебаний рельсовых экипажей не превышает, как правило, 10 Гц. Поэтому в качестве возмущений целесообразно использовать «реальные неровности пути, замеренные вагоном-путеизмерителем, с учетом передаточных функций измерительного механизма» и рекомендованные в п. 3.4 РД 32.68–96³. Вероятностный анализ таких записей, а также способ задания таких возмущений для исследования колебаний рельсовых экипажей являются предметом данной статьи.

Для примера рассмотрим записи колебаний электровагона ВЛ80 по двум различным прямым участкам с нормальным и плохим состоянием пути при скорости движения 100 км/ч (рис. 1, а и б). В этих записях содержатся слагаемые с различными частотами, отсутствует какая-либо периодичность и нельзя выделить влияние каких-либо детерминированных неровностей. Кроме того, амплитуды отдельных слагаемых не имеют фиксированных значений. Поэтому записи этих колебаний можно рассматривать как случайные процессы.

Большое влияние на амплитуды и частоты этих колебаний оказывает состояние пути. Так, на записях, приведенных на рис. 1, б, выполненных при той же скорости движения 100 км/ч, что и на 1, а, но на пути с плохим состоянием, наглядно видно существенное увеличение уровня колебаний.

Поскольку динамические свойства реальных железнодорожных экипажей обусловлены нелинейными

¹ РД 32.68–96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов: дата введения 1997-01-01. М.: ВНИИЖТ, 1996. 17 с.

² Там же.

³ Там же. С. 3.

силовыми характеристиками элементов рессорного подвешивания, поперечной характеристикой рельсового пути и т. п., то их случайные колебания являются нестационарными, и для вероятностного анализа следует применять алгоритм усреднения по множеству реализаций [3, 4]. Необходимое для такого расчета количество реализаций случайного процесса геометрических неровностей рельсового пути (более 4000) возможно получить при помощи генерации с использованием импульсных характеристик формирующего фильтра $k(t)$ ⁴ [3, 4].

В [3, 4] предложен способ генерации реализаций случайного процесса на основе авто- и взаимных корреляционных функций или спектральных и взаимных спектральных плотностей, предполагающий генерацию четырехмерного процесса $\|\eta(t = x/v)\|$ для каждой заданной скорости движения⁵. В настоящей работе предлагается новый, упрощенный метод генерации случайных процессов, который не требует генерации новых реализаций для различных скоростей движения, тем самым значительно сокращая машинное время, затрачиваемое на моделирование динамики разрабатываемых конструкций рельсовых экипажей.

Параметры аналитических выражений для вероятностных характеристик возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей, уточнены на основе анализа длительных (до 14 875 м) записей случайных процессов эквивалентных геометрических неровностей рельсового пути. Это обеспечивает получение более достоверных результатов вероятностного анализа по сравнению с ранее выполненными работами [3, 4], где для получения параметров вероятностных характеристик использовалось восьмикратное повторение реализаций неровностей для участков пути протяженностью 999 м.

Постановка задачи. При решении задач по исследованию колебаний рельсовых экипажей в качестве кинематического возмущения часто используют сгенерированные случайные процессы эквивалентных геометрических неровностей пути, вероятностные характеристики которых аналогичны неровностям, полученным по записям путеизмерительных вагонов. Такие неровности представляют собой четырехмерный случайный процесс $\|\eta(x = vt)\|$, учитывающий не только неровности правого и левого рельсов в плане и профиле пути, определяемые их автокорреляционными функциями $R_{\eta_i}(\tau_x)$ или спектральными плотностями $G_{\eta_i}(f_x)$, но и их взаимосвязи, определяемые взаимными корреляционными функциями

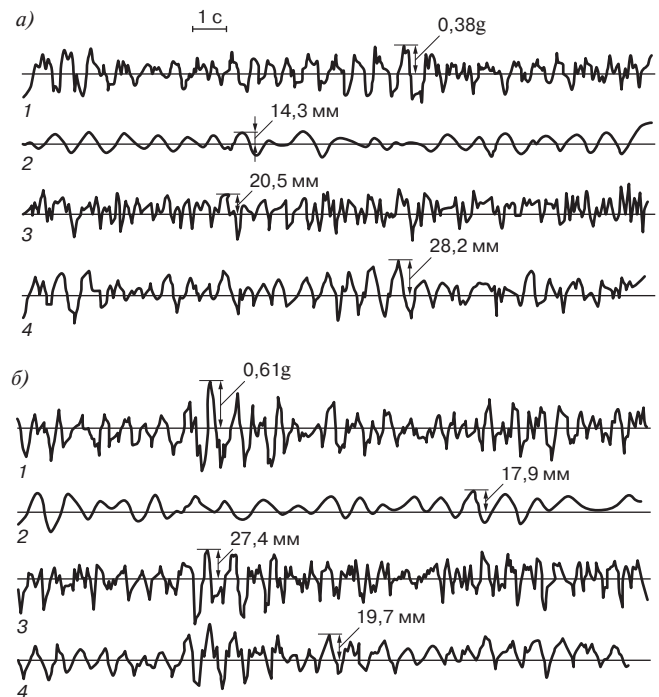


Рис. 1. Записи колебаний механической части электропоезда ВЛ80С при движении со скоростью 100 км/ч по прямым на участках пути хорошего (а) и плохого (б) состояния:

1 — вертикальные ускорения кузова; 2 — поперечные горизонтальные перемещения тележки относительно кузова; 3 и 4 — прогибы соответственно первой и второй ступеней рессорного подвешивания⁶

Fig. 1. Recordings of oscillations of VL80S Electric Locomotive mechanics travelling at 100 km/h in straight lines on sections of good (a) and bad (b) track conditions:

1 — vertical body acceleration; 2 — transverse horizontal displacement of the bogie in relation to the car body; 3 and 4 — deflections of the primary and secondary spring suspension stages, respectively⁶

$R_{\eta_i \eta_j}(\tau_x)$ или взаимными спектральными плотностями $G_{\eta_i \eta_j}(f_x)$:

$$\|\eta(x = vt)\| = \begin{pmatrix} \eta_{\text{пр}}(x = vt) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{\text{лр}}(x = vt) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{\text{пв}}(x = vt) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_{\text{лв}}(x = vt) \end{pmatrix}.$$

Здесь термин «эквивалентные» означает, что такие неровности приближенно учитывают все причины, вызывающие появление колебаний рельсовых экипажей, в том числе процессы взаимодействия колеса и

⁴ Акишин А. А. Горизонтальные колебания и движение в кривых моторного вагона электропоезда на четырех одноосных тележках с пневмоподвешиванием: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2015. 355 с.

⁵ Там же. С. 56.

⁶ Механическая часть тягового подвижного состава: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Бирюков [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. Репринтное воспроизведение издания 1992 г. М.: Альянс, 2013. 440 с.

рельса. Такие неровности следует применять в качестве возмущения при исследовании колебаний математических моделей рельсовых экипажей, движущихся по абсолютно жесткому пути. В отличие от этого, при использовании континуальных и дискретных моделей пути следует применять геометрические неровности, полученные непосредственным измерением на ненагруженном пути [5, 6].

Для вероятностного анализа были использованы длительные реализации эквивалентных неровностей пути, записанные путеизмерительными вагонами. Графики реализаций горизонтальных ($\eta_{лг}(x)$ и $\eta_{лр}(x)$) и вертикальных ($\eta_{лв}(x)$ и $\eta_{пв}(x)$) неровностей левого и правого рельсов (рис. 2) показывают, что они имеют вид случайных колебаний с нулевыми средними значениями и стабильными размахами. Таким образом, в первом приближении их можно рассматривать как реализации эргодических стационарных случайных процессов.

Обычно экспериментальные неровности, записанные путеизмерительными вагонами, являются функциями координаты x . Вместе с тем решение дифференциальных уравнений, описывающих колебания рельсовых экипажей, выполняют в функции времени $t = x/v$. Поэтому для исследования случайных колебаний рельсовых экипажей по вероятностным характеристикам реализаций $\|\eta(t = x/v)\|$ эти реализации необходимо генерировать для каждой заданной скорости движения [1].

Для решения таких задач авто- и взаимные корреляционные функции, а также спектральные и взаимные спектральные плотности случайных процессов $\|\eta(x)\|$ аппроксимируют аналитическими выражениями. По полученным параметрам этих выражений находят импульсные характеристики формирующих фильтров⁷ [3, 4, 7, 8].

Аппроксимация корреляционных функций и спектральных плотностей аналитическими выражениями. Для получения искомых параметров вероятностных характеристик натуральных неровностей был выполнен вероятностный анализ их реализаций⁸ (рис. 2) по методам, рассмотренным в [3, 9–13]. По результатам этого анализа было установлено, что в качестве законов распределения мгновенных значений неровностей могут быть приняты законы распределения Гаусса (законы нормального распределения)⁹. Взаимные корреляционные функции неровностей $R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x)$, представляющие собой матрицу размером 4×4 , определялись непосредственно по реализациям на основе следующей формулы [3]:

$$R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x = i_{сд}\Delta x) = \frac{1}{(N_p - s)\Delta x} \times \sum_{i_{сд}=0}^{(N_p-s)} \eta_i(i_{ш}\Delta x) \eta_u[(i_{ш} + i_{сд})\Delta x], \quad (1)$$

где Δx — шаг пространственной дискретизации реализаций случайных процессов $\eta_i(x)$ и $\eta_u(x)$; $i_{ш}$ — номер шага, $i_{ш} = 0, 1, 2, \dots, N_p$; N_p — число шагов в реализации; $\tau_x = i_{сд}\Delta x$ — сдвиг по координате x между значениями реализаций $\eta_i(i_{ш}\Delta x)$; $i_{сд}$ — номер шага по сдвигу; $s\Delta x$ — максимально допустимая величина этого сдвига при $s = (0, 1 \div 0, 25)N_p$.

При этом в частном случае, при $\eta_u(i_{ш}\Delta x) = \eta_i(i_{ш}\Delta x)$, по формуле (1) вычисляют автокорреляционные функции.

Спектральные плотности неровностей были получены путем численного выполнения преобразования Фурье¹⁰ от корреляционных функций [3]:

$$\begin{aligned} \Phi_{\eta_i\eta_u}(f_x) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x) \cos 2\pi f_x \tau_x d\tau_x; \\ \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x) e^{-j2\pi f_x \tau_x} d\tau_x = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x) \cos 2\pi f_x \tau_x d\tau_x - j \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta_i\eta_u}(\tau_x) \sin 2\pi f_x \tau_x d\tau_x = \\ &= \text{Re } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x) + j \text{Im } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x) = \\ &= \Phi_{\eta_i\eta_u}^A(f_x) \exp[j\Phi_{\eta_i\eta_u}^p(f_x)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь взаимная спектральная плотность $\Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)$ содержит следующие составляющие:

$\text{Re } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)$ — вещественную (синфазную);

$\text{Im } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)$ — мнимую (квадратурную);

$\Phi_{\eta_i\eta_u}^A(f_x) = \sqrt{[\text{Re } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)]^2 + [\text{Im } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)]^2}$ — амплитудную;

$\Phi_{\eta_i\eta_u}^p(f_x) = \arctg[\text{Im } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x) / \text{Re } \Phi_{\eta_i\eta_u}(jf_x)]$ — фазовую.

Графики авто- и взаимных корреляционных функций, а также спектральных и взаимных спектральных плотностей (рис. 3 и 4, кривые 1) были построены по формулам (1)–(3) для реализаций случайных процессов возмущения, приведенных на рис. 2, б, г, е и з. На графиках имеется несколько составляющих. При этом на рис. 4, а и б изображены односторонние спектральные плотности $G_{\eta_i\eta_u}(f) = 4\Phi_{\eta_i\eta_u}(f)$, определенные в диапазоне частот $0 < f < \infty$, а на рис. 4, в...е — двухсторонние составляющие взаимной спектральной плотности, определенные в диапазоне частот $-\infty < f < \infty$.

⁷ Акишин А. А. Указ. соч. С. 60.

⁸ Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.; Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.

⁹ Акишин А. А. Указ. соч. С. 205.

¹⁰ Вентцель Е. С. Указ. соч. С. 434.

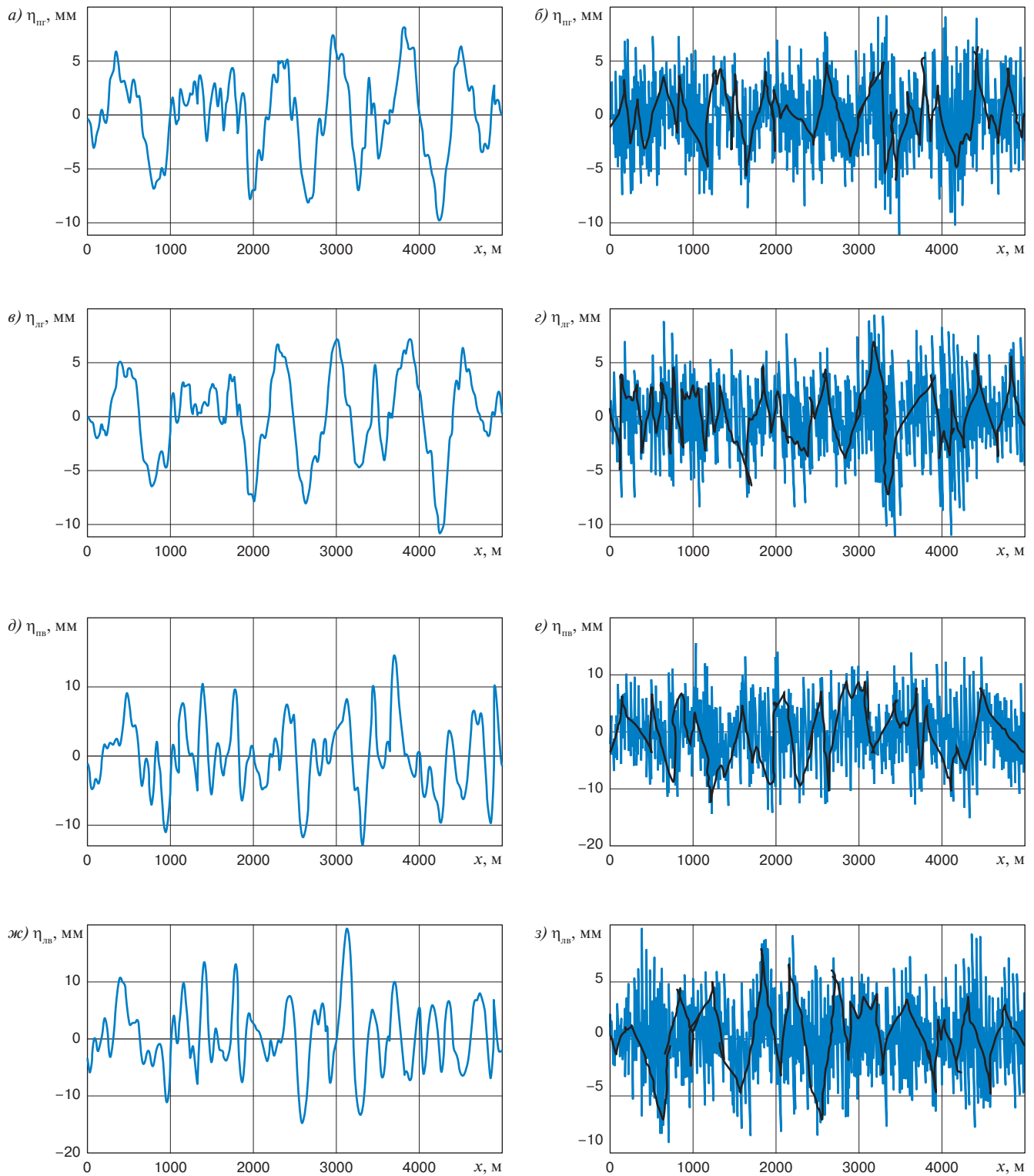


Рис. 2. Реализации случайных процессов эквивалентных геометрических вертикальных и горизонтальных неровностей левого и правого рельсов, полученные:
 а, в, д, ж — по записям путеизмерительного вагона; б, г, е, з — по сгенерированным реализациям
 (черными линиями на рис. б, г, е, з показано изменение мгновенного среднего значения)

Fig. 2. Implementation of random equivalent geometric vertical and horizontal irregularities of the left and right rails obtained:
 а, в, д, ж — from the records of the track measuring car; б, г, е, з — from generated implementations
 (the black lines in fig. б, г, е, з show the instantaneous average)

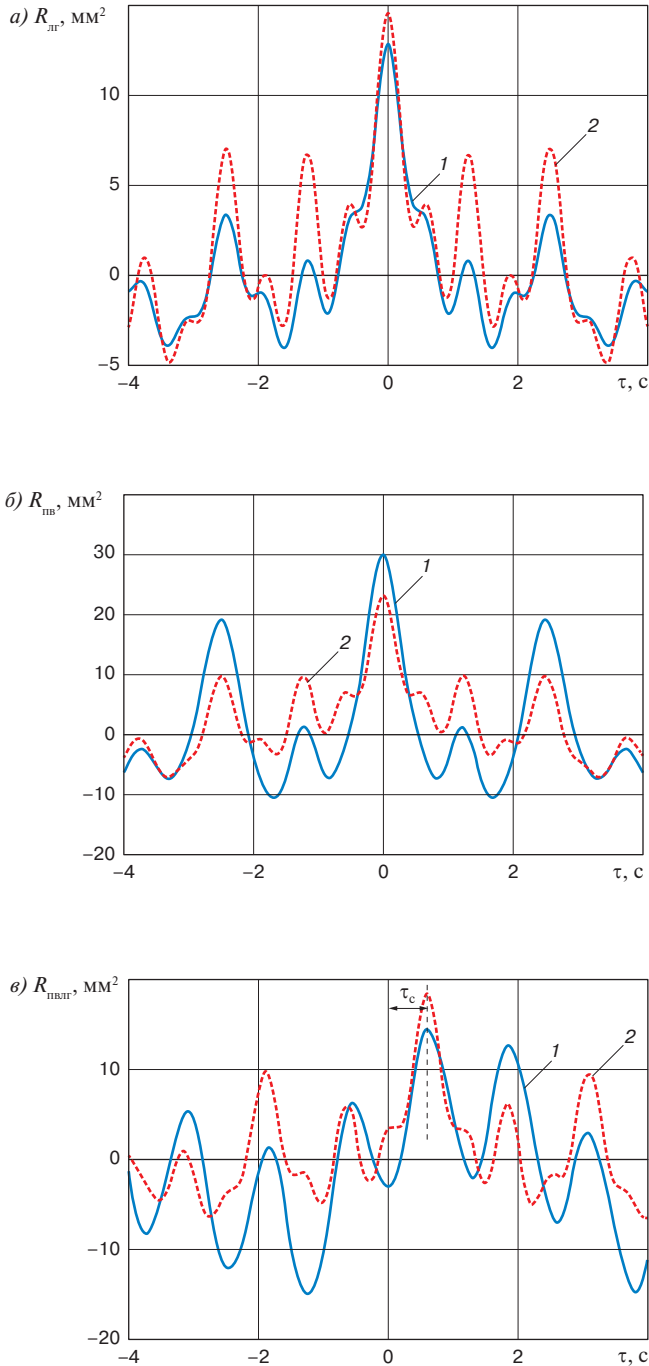


Рис. 3. Автокорреляционные функции левой горизонтальной (а) и правой вертикальной (б) неровностей рельсового пути, а также их взаимная корреляционная функция (в), найденные для скорости 20 м/с:
1 — построенные по формуле (1) по сгенерированным реализациям; 2 — построенные по аналитическим выражениям (4)–(5); τ — сдвиг

Fig. 3. Autocorrelation functions of the left horizontal (a) and right vertical (б) rail track irregularities, and their cross-correlation function (в) found for a speed of 20 m/s:
1 — plotted by Formula (1) on the generated implementations;
2 — plotted by analytical expressions (4)–(5);
 τ — shift

Корреляционные функции и спектральные плотности, найденные по формулам (1)–(3), были аппроксимированы аналитическими выражениями, соответствующими дифференцируемым стационарным, эргодическим случайным процессам:

$$R_{\eta_i \eta_u}(\tau_{(x)}) = S_{\eta_i} S_{\eta_u} \sum_v a_v e^{-[\alpha_v^{(*)}(\tau_{(x)} - \tau_{c(x)})]^2} \times \cos[2\pi\theta_v^{(*)}(\tau_{(x)} - \tau_{c(x)})], \quad (4)$$

где S_{η_i} и S_{η_u} — среднеквадратические отклонения случайных процессов различных неровностей; a_v — доля дисперсии $S_{\eta_{i,u}}^2 = S_{\eta_i} S_{\eta_u}$, приходящаяся на v -ю составляющую; $\alpha_v = \alpha_v^* v$ и $\theta_v = \theta_v^* v$ — коэффициент затухания и частота v -х составляющих, $[c^{-1} = m^{-1} \cdot m/c]$; $\tau_x = \tau v$ — сдвиг между значениями корреляционных функций, $[m = c \cdot m/c]$; $\tau_{cx} = \tau_c v$ — сдвиг максимума взаимной корреляционной функции относительно начала координат, $[m = c \cdot m/c]$.

Корреляционная функция по данному выражению может быть получена и в функции координаты пути, если подставить значения α_v^* и θ_v^* в m^{-1} и τ в m , или времени, если подставить соответствующие значения в c^{-1} и c , причем при скорости $v = 1$ м/с значения этих величин совпадают.

Из этого выражения взаимных корреляционных функций (как частный случай при $i = u$ и $\tau_{c(x)} = 0$) можно получить аналитическое выражение для автокорреляционных функций:

$$R_{\eta_i(\eta_u)}(\tau_{(x)}) = S_{\eta_i(\eta_u)}^2 \sum_v a_v e^{-(\alpha_v^{(*)} \tau_{(x)})^2} \cos(2\pi\theta_v^{(*)} \tau_{(x)}), \quad (5)$$

где $S_{\eta_i(\eta_u)}^2$ — дисперсия соответствующего случайного процесса $\eta_i(x)$ или $\eta_u(x)$.

Этим корреляционным функциям соответствуют спектральные $\Phi_{\eta_i(\eta_u)}(f_x)$ и взаимные спектральные плотности $\Phi_{\eta_i \eta_u}(if_x)$, определяемые как преобразование Фурье (2) и (3) от соответствующих корреляционных и взаимных корреляционных функций. При этом аналитическое выражение спектральной плотности имеет вид

$$\Phi_{\eta_i(\eta_u)}(f_x) = \frac{S_{\eta_i(\eta_u)}^2 \sqrt{\pi}}{2} \sum_v \frac{a_v}{\alpha_v^*} \times \left\{ \exp \left[-\left(\frac{2\pi(f_x - \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] + \exp \left[-\left(\frac{2\pi(f_x + \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] \right\}. \quad (6)$$

В отличие от этого взаимная спектральная плотность, определяемая формулой (3), является комплексной функцией частоты [13], и ее составляющие могут быть представлены следующими выражениями [14]:

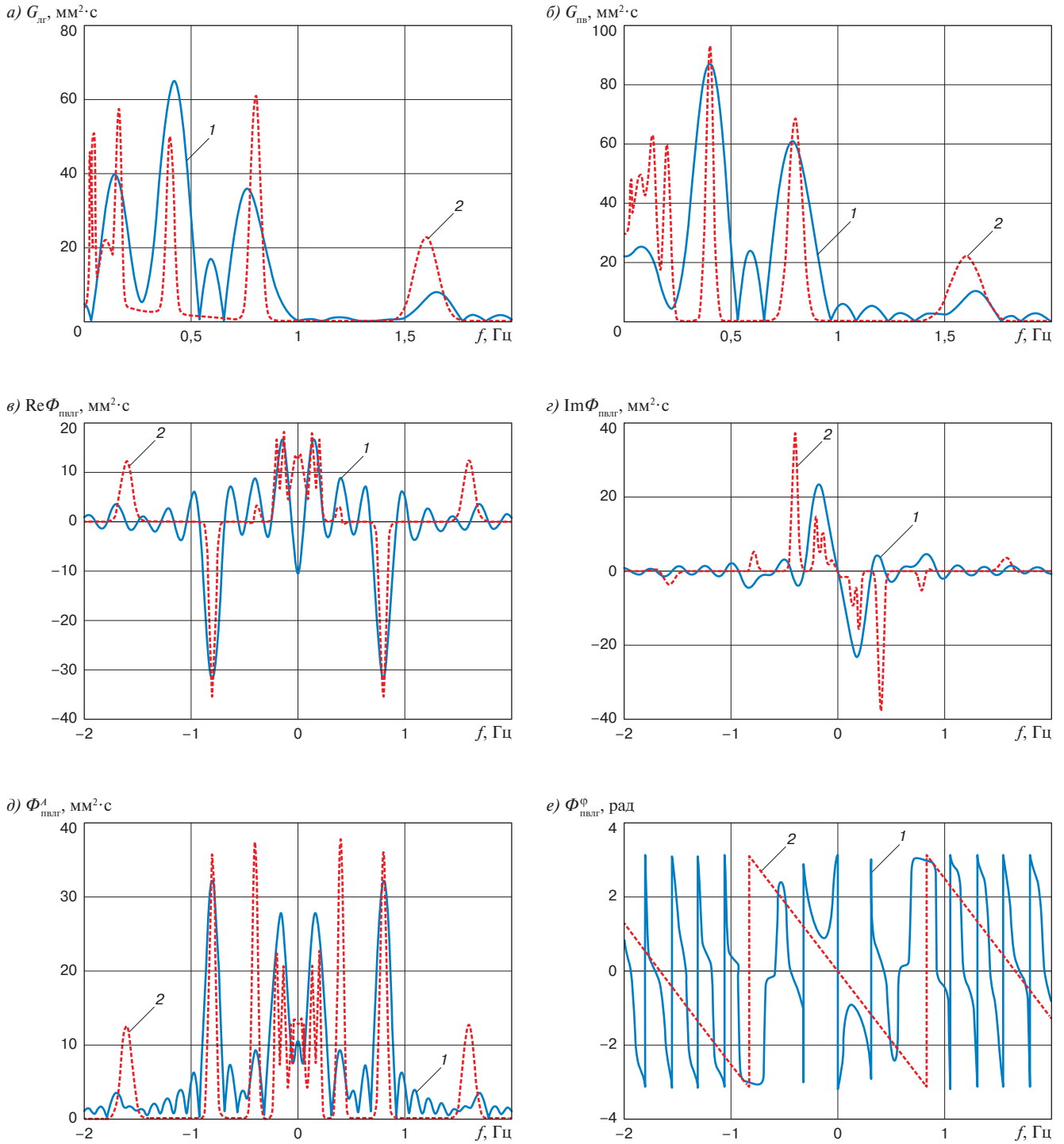


Рис. 4. Спектральные плотности левой горизонтальной (а) и правой вертикальной неровностей (б), а также составляющие их взаимной спектральной плотности — вещественная (в), мнимая (г), амплитудная (д), фазовая (е):
1 — построенные по сгенерированным реализациям; 2 — построенные по аналитическим выражениям (6)–(10)

Fig. 4. Spectral densities of the left horizontal (a) and right vertical (б) irregularities, and the components of their cross-spectral density — real (в), imaginary (г), amplitude (д), phase (е):
1 — plotted on generated implementations; 2 — plotted by analytical expressions (6)–(10)

$$\operatorname{Re} \Phi_{\eta_l \eta_u}(j f_x) = \frac{S_{\eta_l} S_{\eta_u} \sqrt{\pi}}{2} \sum_v \frac{a_v}{\alpha_v^*} \cos(2\pi f_x \tau_{cx}) \times \\ \times \left\{ \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x + \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] + \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x - \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] \right\}; \quad (7)$$

$$\operatorname{Im} \Phi_{\eta_l \eta_u}(j f_x) = \frac{S_{\eta_l} S_{\eta_u} \sqrt{\pi}}{2} \sum_v \frac{a_v}{\alpha_v^*} \sin(2\pi f_x \tau_{cx}) \times \\ \times \left\{ \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x + \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] - \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x - \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] \right\}; \quad (8)$$

$$\Phi_{\eta_l \eta_u}^A(f_x) = \frac{S_{\eta_l} S_{\eta_u} \sqrt{\pi}}{2} \sum_v \frac{a_v}{\alpha_v^*} \times \\ \times \left\{ \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x + \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] + \exp \left[- \left(\frac{2\pi(f_x - \theta_v^*)}{4\alpha_v^*} \right)^2 \right] \right\}; \quad (9)$$

$$\Phi_{\eta_l \eta_u}^{\Phi}(f_x) = \begin{cases} -2\pi \tau_{cx} f_x & \text{при } -\frac{1}{2|\tau_{cx}|} \leq f_x \leq \frac{1}{2|\tau_{cx}|}; \\ -2\pi \tau_{cx} f_x + \operatorname{sign}(\tau_{cx})(p+1)\pi & \text{при } f_x > \frac{p}{2|\tau_{cx}|}; \\ -2\pi \tau_{cx} f_x - \operatorname{sign}(\tau_{cx})(p+1)\pi & \text{при } f_x < -\frac{p}{2|\tau_{cx}|}, \end{cases} \quad (10)$$

где p — нечетное ($p = 1, 3, 5, \dots$).

Параметры аналитических выражений (5)–(10) были найдены следующим образом. Дисперсии $S_{\eta_l(\eta_u)}^2$ или среднеквадратические отклонения $S_{\eta_l(\eta_u)}$, а также сдвиг τ_{cx} определялись по графикам авто- и взаимных корреляционных функций (рис. 3), в то же время частота θ_v^* — по графикам спектральных плотностей и их амплитудных составляющих (рис. 4).

Величины a_v и α_v^* определялись на основе минимизации при всех частотах $i_f = 0, 1, 2, \dots, N_f$; суммы квадратов отклонений значений нормированных расчетных $\phi_p(f_{i_f x}) = \Phi_p(f_{i_f x})/S_p^2$ от экспериментальных спектральных плотностей $\phi_3(f_{i_f x}) = \Phi_3(f_{i_f x})/S_3^2$ по методу наименьших квадратов [15]:

$$\sum_{i_f=1}^{N_f} [\phi_p(f_{i_f x}) - \phi_3(f_{i_f x})]^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

При этом нулевые приближения для a_v определялись непосредственно по графикам спектральной

плотности (6) и амплитудной составляющей взаимной спектральной плотности (9), а для α_v^* находились как половина ширины v -го максимума $\phi_3(f_{i_f x})$ на уровне половины его высоты.

Экспериментально полученные спектральные и взаимные спектральные плотности были дополнены составляющими с более высокими частотами $f_x = 0,01 \div 0,08 \text{ м}^{-1}$, соответствующими меньшим дли-

нам волн $L_b = \frac{1}{f_x} = 12,5 \div 100 \text{ м}$. Для их определения

были выделены отдельные отрезки реализаций, где проявились такие частоты, и был выполнен корреляционный и спектральный анализ, который учел присутствие таких составляющих. Отметим, что для обеспечения необходимого частотного диапазона возмущений большая часть дисперсии (не менее 80 %) должна приходиться на неровности с короткими длинами волн (до 150 м включительно).

В результате были получены параметры десяти аналитических выражений вероятностных характеристик случайных процессов неровностей рельсового пути, содержащих по 11–14 слагаемых каждая, необходимые для генерации многомерного случайного процесса возмущения рельсовых экипажей (4 авто и 6 взаимных). Эти составляющие соответствуют полной симметричной матрице корреляционных функций:

$$\mathbf{R}_{\eta_l \eta_u}(\tau) = \begin{bmatrix} R_{\eta_1, \eta_1} & R_{\eta_1, \eta_2} & R_{\eta_1, \eta_3} & R_{\eta_1, \eta_4} \\ R_{\eta_2, \eta_1} & R_{\eta_2, \eta_2} & R_{\eta_2, \eta_3} & R_{\eta_2, \eta_4} \\ R_{\eta_3, \eta_1} & R_{\eta_3, \eta_2} & R_{\eta_3, \eta_3} & R_{\eta_3, \eta_4} \\ R_{\eta_4, \eta_1} & R_{\eta_4, \eta_2} & R_{\eta_4, \eta_3} & R_{\eta_4, \eta_4} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

по главной диагонали которой расположены автокорреляционные функции, а остальные элементы являются взаимными корреляционными функциями, причем $R_{\eta_l \eta_u}(\tau) = R_{\eta_u \eta_l}(-\tau)^{11}$.

Для примера в табл. 1 приведены параметры аналитических выражений, найденные для $R_{\text{лг}}(\tau_x)$, $R_{\text{пв}}(\tau_x)$ и $R_{\text{пвлг}}(\tau_x)$. Как видно из табл. 1, полученные параметры автокорреляционной функции левой горизонтальной неровности $R_{\text{лг}}$ содержат 14 слагаемых, соответствующих длинам волн $L_{\text{бв}}$ от 12,5 до 850 м, параметры автокорреляционной функции правой вертикальной неровности $R_{\text{пв}}$ — 12 слагаемых, соответствующих длинам волн $L_{\text{бв}}$ от 12,5 до 825 м, а параметры их взаимной корреляционной функции $R_{\text{пвлг}}$ — 12 слагаемых, соответствующих длинам волн $L_{\text{бв}}$ от 12,5 до 900 м. Такой диапазон длин волн обеспечивает необходимый диапазон частот возмущения при исследовании колебаний рельсовых экипажей.

¹¹ Вентцель Е. С. Теория вероятностей. С. 185.

Таблица 1

Параметры аналитических выражений автокорреляционных $R_{\text{лг}}(\tau_x)$, $R_{\text{пв}}(\tau_x)$ и взаимной корреляционной $R_{\text{пв,лг}}(\tau_x)$ функций

Table 1

Parameters of analytical expressions of autocorrelation $R_{\text{лг}}(\tau_x)$, $R_{\text{пв}}(\tau_x)$ and cross-correlation $R_{\text{пв,лг}}(\tau_x)$ functions

Номер составляющей ν	Доля дисперсии a_ν	Нормированный коэффициент затухания α_ν^* , м^{-1}	Нормированная частота θ_ν^* , м^{-1}	Длина волны неровности $L_{\text{вн}}$, м
$R_{\text{лг}}(S_{\text{лг}}^2 = 14,6 \text{ мм}^2; \tau_{\text{сх}} = 0 \text{ м})$				
1	0,0066	0,000368	0,00118	850
2	0,02981	0,001306	0,00148	675
3	0,003979	0,0001546	0,00174	575
4	0,001342	0,0001702	0,0021	475
5	0,028	$8,323 \cdot 10^{-4}$	0,00235	425
6	$1,282 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	0,00267	375
7	$7,249 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,00286	350
8	$3,971 \cdot 10^{-5}$	$1,006 \cdot 10^{-6}$	0,0033	300
9	0,1014	0,007	0,005	200
10	0,10966	0,002746	0,008	125
11	0,1229	0,07149	0,01	100
12	0,14264	0,003857	0,02	50
13	0,2405	0,00512	0,04	25
14	0,213	0,012	0,08	12,5
$R_{\text{пв}}(S_{\text{пв}}^2 = 23,1 \text{ мм}^2; \tau_{\text{сх}} = 0 \text{ м})$				
1	0,0011	0,0002099	0,0012	825
2	0,003923	0,0005352	0,0016	625
3	0,07083	0,01	0,0021	475
4	$3,968 \cdot 10^{-5}$	0,0002929	0,0025	400
5	$6,629 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	0,0031	325
6	0,0797	0,009729	0,0033	300
7	0,05195	$4,772 \cdot 10^{-3}$	0,004	250
8	0,1038	0,00389	0,0067	150
9	0,10212	0,003512	0,01	100
10	0,17928	0,003931	0,02	50
11	0,2394	0,007128	0,04	25
12	0,16775	0,01548	0,08	12,5
$R_{\text{пв,лг}}(S_{\text{пв}} S_{\text{лг}} = 18,4 \text{ мм}^2; \tau_{\text{сх}} = 12,025 \text{ м})$				
1	0,06725	0,007158	0,0011	900
2	0,01529	0,003163	0,0016	625
3	0,001859	0,0007134	0,002	500
4	0,0001053	0,0001101	0,00235	425
5	0,009694	0,0009628	0,0031	325
6	0,009224	0,001948	0,004	250
7	$2,221 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$	0,005	200
8	0,1089	0,004281	0,0067	150
9	0,098	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,01	100
10	0,2443	0,005249	0,02	50
11	0,27	0,0061	0,04	25
12	0,17533	0,011155	0,08	12,5

Метод и результаты генерации случайных процессов неровностей рельсов. По найденным значениям параметров была выполнена генерация случайных процессов неровностей с использованием импульсной характеристики формирующего фильтра¹² [3, 4]. Поскольку решение дифференциальных уравнений, описывающих колебания рельсовых экипажей, выполняется в функции времени $t = x/v$, то при исследованиях случайных колебаний рельсовых экипажей необходимо по вероятностным характеристикам реализаций $\|\eta(x = vt)\|$ выполнять генерацию реализаций $\|\eta(t = x/v)\|$ для различных скоростей движения.

Схема генерации многомерного случайного процесса неровностей пути во временной области (рис. 4), предложенная в [3, 4], включает в себя пять генераторов белого шума¹³. Четыре генератора (ГШ1–ГШ4) формируют последовательности дискретных псевдослучайных чисел $y(nT)$, распределенные по нормальному закону. Здесь $T = 0,01$ с — шаг дискретизации, $n = 1, 2, 3, \dots, N$ — количество шагов ($N = 4096$ для обеспечения длительности реализации $NT = 40,96$ с). Пятый генератор (ГШ5) задает исходные начальные случайные числа для ГШ1–ГШ4.

Для реализации этой схемы генерации случайных процессов по принятым аналитическим выражениям авто- и взаимных корреляционных функций с параметрами $S_{\eta_i(\eta_u)}$, α_v , α_v^* и θ_v^* определялись импульсные характеристики формирующего фильтра при заданной скорости движения v , м/с¹⁴ [4]:

$$k_{\eta_i(\eta_u)}(nT) = S_{\eta_i(\eta_u)} \sum_v \alpha_v e^{-(\alpha_v nT)^2} \cos(2\pi\theta_v nT); \quad (13)$$

$$k_{\eta_i\eta_u}(nT) = \sqrt{S_{\eta_i} S_{\eta_u}} \sum_v \alpha_v e^{-[\alpha_v(n-n_c)T]^2} \cos[2\pi\theta_v(n-n_c)T],$$

где $\alpha_v = \alpha_v^* v$, $\theta_v = \theta_v^* v$, $\tau = nT$ и $\tau_c = n_c T$.

Сигналы с выходов ГШ1–ГШ4 в блоках $k_{i,j}$ умножают на значения соответствующих импульсных характеристик и далее вычисляют интеграл Дюамеля, представляющий собой свертку двух функций [8, 11]:

$$\int_0^\infty u(\tau) d\tau = \sum_{n_c T} k_{\eta_i(\eta_u)}[(n-n_c)T] y(nT). \quad (14)$$

Для получения многомерного случайного процесса неровности $\eta_x(t)$ в каждый момент времени складывались результаты четырех сверток (14) — одной с импульсной характеристикой, параметры которой соответствуют автокорреляционной функции искомой неровности рельсового пути, других с импульсными

характеристиками, параметры которых соответствуют взаимным корреляционным функциям этой неровности с тремя другими.

Рассмотрим несколько примеров генерации случайных процессов $\|\eta[t = (x/v)]\|$ с параметрами, приведенными в таблице, выполненных для решения следующих задач:

- проверки сходимости графиков сгенерированных реализаций случайных процессов неровностей (рис. 2, б) с исходными реализациями (рис. 2, а);
- проверки сходимости графиков вероятностных характеристик, построенных по формулам (1)–(3) для сгенерированных реализаций с аналогичными графиками, построенными по аналитическим выражениям (4)–(5) для заданной скорости движения v , м/с (рис. 3 и 4);
- анализа влияния скорости движения на характер сгенерированных реализаций и их вероятностные характеристики.

Для проверки сходимости экспериментальных (рис. 2, а) и сгенерированных реализаций случайных процессов $\eta_x(t)$ генерация этих процессов выполнялась по значениям параметров соответствующих аналитических выражений, приведенных в табл. 1. Графики сгенерированных реализаций $\eta_x(x)$ (рис. 2, б) имеют удовлетворительную сходимость с графиками, построенными по экспериментальным данным (рис. 2, а). Эти графики (рис. 2, б) также имеют вид случайных колебаний с нулевыми средними значениями и стабильными размахами. Поэтому в первом приближении их также можно рассматривать как реализации эргодических стационарных случайных процессов. Вместе с тем в графиках сгенерированных процессов имеются составляющие с более высокими частотами, которые были получены по дополнительным реализациям для обеспечения необходимого диапазона частот возмущения.

На рис. 3 приведены автокорреляционные функции левой горизонтальной $R_{\eta\eta}(\tau)$ и правой вертикальной $R_{\eta v}(\tau)$ неровностей, а также их взаимная корреляционная функция $R_{\eta v\eta\eta}(\tau)$. Как видно из этого рисунка, полученные графики содержат несколько затухающих косинусоидальных составляющих. Затухание этих графиков свидетельствует о том, что для исследуемых случайных процессов выполняются условия стационарности и эргодичности¹⁵ [3]. Кроме того, максимум взаимной корреляционной функции сдвинут на величину τ_c относительно начала координат.

Графики корреляционных функций, построенные по сгенерированным реализациям (рис. 3, кривые 1), показывают удовлетворительную сходимость

¹² Акишин А. А. Указ. соч. С. 60.

¹³ Там же.

¹⁴ Там же.

¹⁵ Вентцель Е. С. Теория вероятностей. С. 421; Механическая часть тягового подвижного состава. С. 54.

с теоретическими графиками, построенными по аналитическим выражениям (4) – (5) (рис. 3, кривые 2).

По корреляционным функциям путем численного преобразования Фурье были найдены спектральные плотности $G_{лг}(f)$ и $G_{пв}(f)$, а также составляющие взаимной спектральной плотности $\Phi_{пвлг}(jf)$ (рис. 4).

Как видно из рис. 4 (а–д), графики спектральных плотностей исследуемых процессов, как и корреляционные функции (рис. 3), состоят из ряда слагаемых. Отметим, что графики, построенные по формулам (2) и (3) – линии 1, также показывают удовлетворительную сходимость с графиками, построенными по аналитическим выражениям (6) – (10) – линии 2, так как их максимумы приходятся на одинаковые частоты. При этом из составляющих взаимной спектральной плотности наилучшую сходимость показал график амплитудной составляющей $\Phi_{пвлг}^A(f)$.

Упрощение генерации случайного процесса возмущения с помощью импульсной характеристики. Выполним упрощение метода генерации случайных процессов возмущения (рис. 5), предложенного в работах [3, 4]. Для этого выполним такую генерацию в функции координаты, где шаг дискретизации по координате постоянен $X = 0,185$ м. В этом случае для нахождения импульсных характеристик используем параметры α_v^* и θ_v^* (1/м), не зависящие от скорости движения, и импульсные характеристики формирующего фильтра не будут зависеть от скорости движения:

$$k_{\eta_l(\eta_u)}(nX) = S_{\eta_l(\eta_u)} \sum_v a_v e^{-(\alpha_v^* nX)^2} \cos(2\pi\theta_v^* nX); \quad (15)$$

$$k_{\eta_l(\eta_u)}(nX) = \sqrt{S_{\eta_l} S_{\eta_u}} \sum_v a_v e^{-[\alpha_v^*(n-n_c)X]^2} \times \cos[2\pi\theta_v^*(n-n_c)X]. \quad (16)$$

В результате генерации получаются реализации многомерных неровностей пути в функции координаты $\|\eta_{i,j}(x) = vt\|$. Затем, в отличие от работ [3, 4], не будем выполнять процедуры генерации случайных процессов $\|\eta_{i,j}(t = x/v)\|$ для каждой из заданных скоростей. Вместо этого выполним пересчет полученных реализаций $\|\eta_{i,j}(x)\|$ на реализации $\|\eta_{i,j}(t)\|$, заменяя в сгенерированных реализациях $\|\eta_{i,j}(x)\|$ координату $x = nX$, ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) на координату $t = nX/v$ для каждой заданной скорости движения v .

Проведем оценку применимости данного упрощенного метода, сравнив результаты генерации с реализациями, сгенерированными по ранее предложенному методу [3, 4], для различных скоростей движения (рис. 6, 7, 8). При этом по новому способу была сгенерирована одна реализация в функции координаты x , для которой пересчитывался шаг дискретизации по времени $T = X/v$ для каждой выбранной

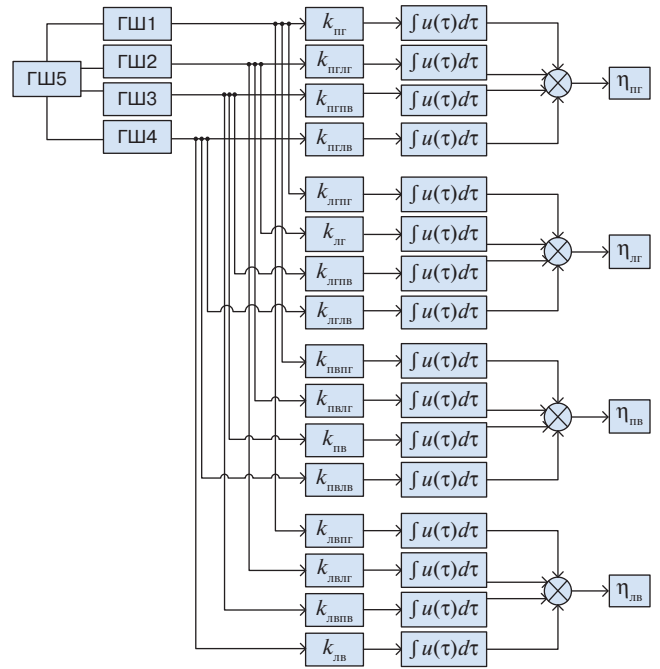


Рис. 5. Схема генератора многомерного случайного процесса возмущения:

ГШ1 – ГШ4 – генераторы последовательности дискретных псевдослучайных чисел; ГШ5 – генератор исходных начальных случайных чисел для ГШ1 – ГШ4; k – импульсная характеристика; η – геометрическая неровность рельсового пути, пг – горизонтальная правого рельса, лг – горизонтальная левого рельса, пв – вертикальная правого рельса, лв – вертикальная левого рельса

Fig. 5. Multivariate random disturbance process generator diagram: ГШ1 – ГШ4 – discrete pseudorandom number sequence generators; ГШ5 – initial random number generator for ГШ1 – ГШ4; k – impulse response; η – rail track geometric irregularity; пг – right rail horizontal; лг – left rail horizontal; пв – right rail vertical; лв – left rail vertical

скорости. Так, для скорости 20 м/с этот шаг составил $T = 0,00925$ с, для скорости 60 м/с – $T = 0,0031$ с, а для скорости 120 м/с – $T = 0,0015$ с.

При этом реализация случайного процесса правой вертикальной неровности (рис. 6, б; рис. 7, б; рис. 8, б), сгенерированная по новому, упрощенному методу, так же как и реализация, сгенерированная по ранее предложенному методу, имеет вид случайного колебания с нулевым средним значением и стабильным размахом. Поэтому в первом приближении эти процессы также можно рассматривать как реализации эргодических стационарных случайных процессов. Спектральные плотности $G_{пв}(f)$ (рис. 6, в; рис. 7, в; рис. 8, в, поз. 2), вычисленные для реализации, сгенерированной упрощенным способом, при каждой из заданных скоростей движения, показали удовлетворительную сходимость со спектральными плотностями $G_{пв}(f)$ (рис. 6, в; рис. 7, в; рис. 8, в, поз. 1), вычисленными для реализаций,

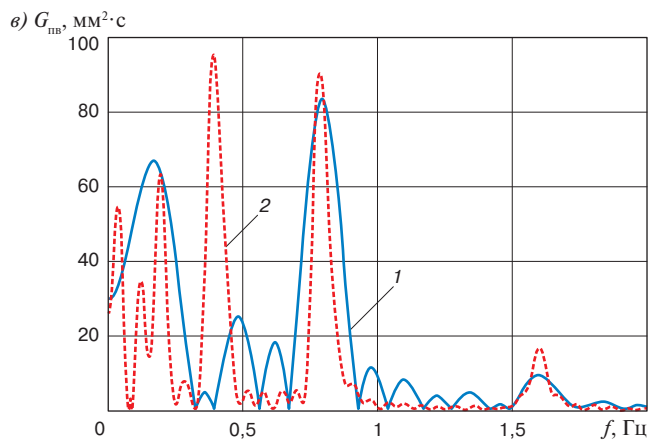
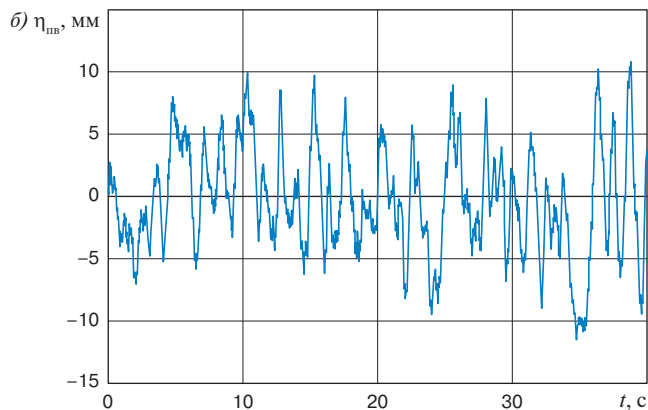
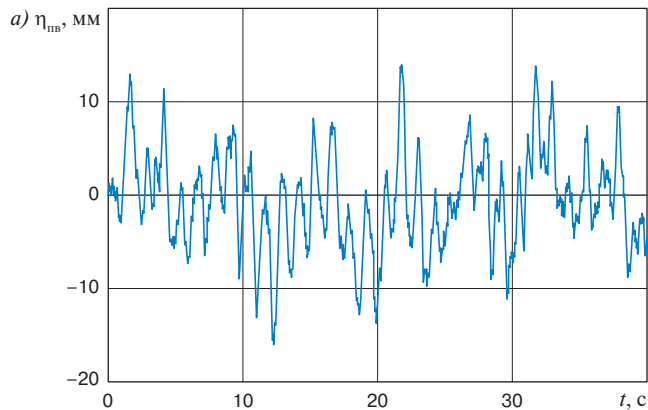


Рис. 6. Графики, полученные для неровности правого рельса при скорости 20 м/с:

а — реализации, сгенерированные ранее предложенным способом генерации; б — реализации, сгенерированные упрощенным способом генерации; в — спектральные плотности: 1 — полученные для реализации, сгенерированной ранее предложенным способом; 2 — полученные для реализации, сгенерированной упрощенным способом

Fig. 6. Graphs for the right rail irregularities at 20 m/s:
а — implementations generated by previous methods;
б — implementations generated by the simplified method;
в — spectral densities: 1 — for implementations generated by previous methods; 2 — for implementations generated by the simplified method

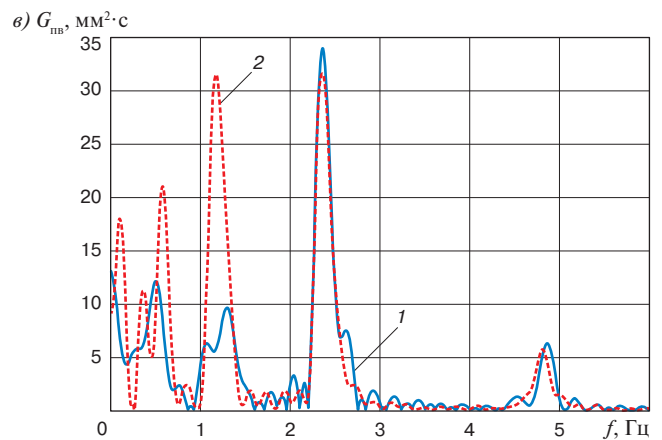
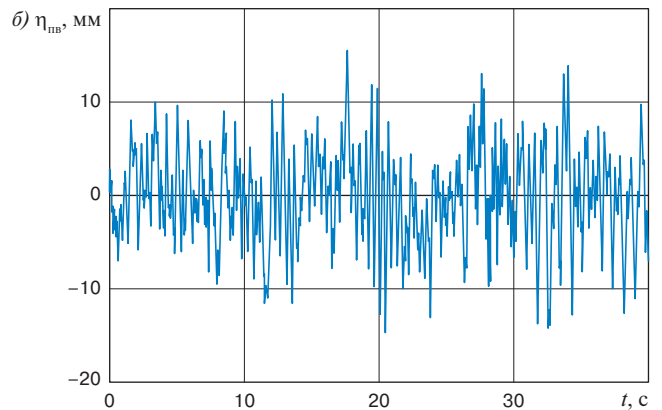
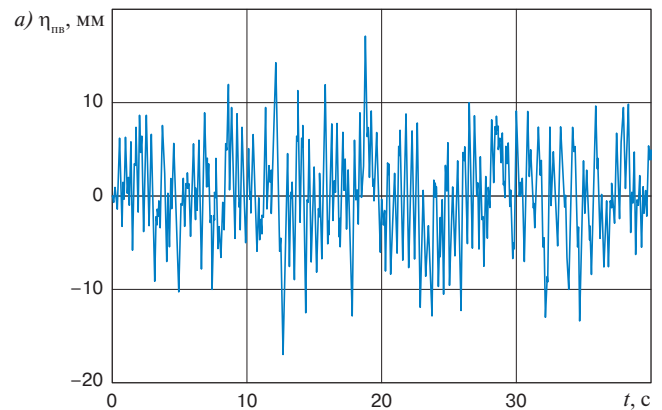


Рис. 7. Графики, полученные для неровности правого рельса при скорости 60 м/с:

а — реализации, сгенерированные ранее предложенным способом генерации; б — реализации, сгенерированные упрощенным способом генерации; в — спектральные плотности: 1 — полученные для реализации, сгенерированной ранее предложенным способом; 2 — полученные для реализации, сгенерированной упрощенным способом

Fig. 7. Graphs for the right rail irregularities at 60 m/s:
а — implementations generated by previous methods;
б — implementations generated by the simplified method;
в — spectral densities: 1 — for implementations generated by previous methods; 2 — for implementations generated by the simplified method

сгенерированных ранее предложенным в работах [3, 4] способом, так как при одинаковых скоростях движения в реализациях проявляются одни и те же составляющие спектральных плотностей. При этом, как показывают графики, сходимость спектральных плотностей улучшается с ростом скорости движения.

Таким образом, новый, упрощенный способ генерации целесообразно использовать при решении задач динамики рельсовых экипажей, так как значительно упрощается процедура задания возмущений для исследования колебаний нелинейных систем. Это обусловлено тем, что можно использовать множество однократно сгенерированных реализаций неровностей в функции координаты $\|\eta_{i,j}(x)\|$, вместо того чтобы генерировать такие множества для каждой скорости движения.

Также отметим, что с увеличением скорости движения возрастают частоты возмущений $f = f_x v$ и меняется вид графиков реализаций и спектральных плотностей: они становятся более высокочастотными. Например, при скорости движения $v = 20$ м/с в графике спектральной плотности присутствуют частоты до 1,6 Гц, которые влияют на вертикальные колебания кузова подвижного состава, частота собственных колебаний которого составляет 1,3–1,5 Гц (рис. 6).

При скорости движения $v = 60$ м/с диапазон частот графика $G_{пв}(f)$ расширяется уже до 4,8 Гц и будет влиять на колебания кузова и тележек (рис. 7). При скорости $v = 120$ м/с высокие частоты графиков $G_{пв}(f)$ достигают значений 9,6 Гц и превышают собственные частоты вертикальных колебаний тележек (рис. 8). Этот анализ наглядно показывает необходимость отдельного формирования возмущений для различных скоростей движения.

Кроме того, определенный интерес представляет и анализ длин волн неровностей L_b , которые можно определить как $L_b = v/f$. Диапазон частот и соответствующих длин волн для сгенерированных реализаций возмущения приведен в табл. 2 и показывает следующее. Высшим частотам спектральных плотностей при всех скоростях движения соответствует длина

Таблица 2

Диапазоны частот и длин волн неровностей
для различных скоростей движения

Table 2

Irregularities wavelength and frequency ranges
for different speed movements

Скорость движения, м/с	Диапазон частот, Гц	Диапазон длин волн, м
20	0,2÷1,6	100÷12,5
60	0,2÷4,8	300÷12,5
120	0,2÷9,6	600÷12,5

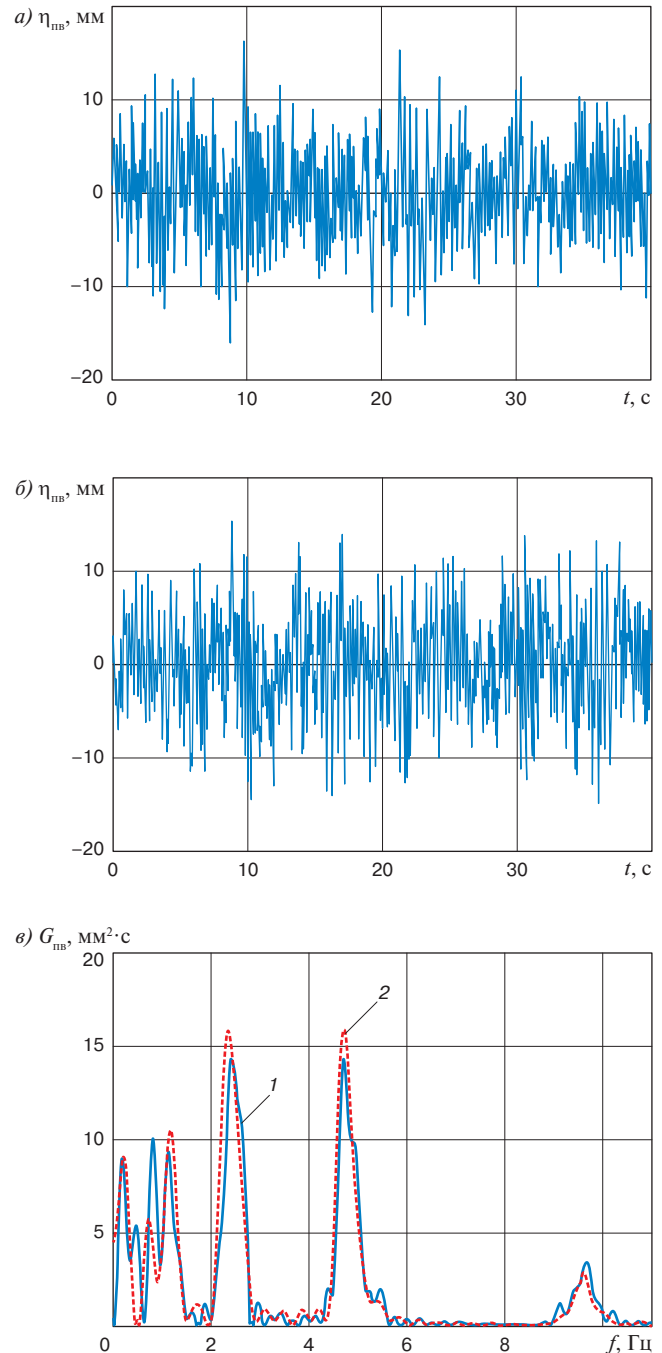


Рис. 8. Графики, полученные для неровности
правого рельса при скорости 120 м/с:

a — реализации, сгенерированные ранее предложенным способом генерации; *б* — реализации, сгенерированные упрощенным способом генерации; *в* — спектральные плотности: 1 — полученные для реализации, сгенерированной ранее предложенным способом; 2 — полученные для реализации, сгенерированной упрощенным способом

Fig. 8. Graphs for the right rail irregularities at 120 m/s:
a — implementations generated by previous methods;
б — implementations generated by the simplified method;
в — spectral densities: 1 — for implementations generated by previous methods; 2 — for implementations generated by the simplified method

волны 12,5 м. Вместе с тем низшей частоте $G_{\text{нв}}(f)$ соответствуют длины волн, изменяющиеся с ростом скорости от 100 м при $v = 20$ м/с и до 600 м при $v = 120$ м/с.

Этот анализ также подтверждает необходимость формирования возмущений для различных скоростей движения.

Обсуждение и заключение. При использовании для анализа длительных (свыше 14 км) реализаций случайных процессов геометрических неровностей рельсового пути, записанных вагонами-путеизмерителями, обеспечивается возможность получения достоверных результатов, которые могут быть применены для генерирования неровностей. Предложенные аналитические выражения для аппроксимации авто- и взаимных корреляционных функций, а также функций спектральной и взаимной спектральной плотности эквивалентных геометрических неровностей пути учитывают специфику исследуемых процессов. Графики, построенные по их аналитическим выражениям, обеспечивают удовлетворительную сходимость с графиками характеристик, построенными по результатам численного вероятностного анализа сгенерированных случайных процессов неровностей. Полученные при аппроксимации параметры вероятностных характеристик возмущений могут быть использованы для генерации многомерных эквивалентных геометрических неровностей, учитывающих инерционные и упруго-диссипативные свойства рельсового пути. Такие процессы могут быть использованы в качестве возмущений в моделях колебаний рельсовых экипажей, движущихся по абсолютно жесткому пути. Упрощенный способ генерации возмущений в функции координаты x показал удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными и с результатами генерации ранее предложенным способом. Он может быть эффективно использован при решении задач динамики рельсовых экипажей, в том числе для сложных нелинейных систем. Применение данного способа не требует генерации новых реализаций неровностей для каждой заданной скорости движения, что существенно сокращает затраты машинного времени на моделирование.

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. Кудрявцев Н. Н. Исследование динамики необрессоренных масс вагонов. М.: Транспорт, 1965. 168 с. [Kudryavtsev N. N. *A study in the dynamics of unsprung masses of carriages*. Moscow: Transport Publ.; 1965. 168 p. (In Russ.)].
2. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: Транспорт, 1997. 325 с. [Kogan A. Ya. *Railway track dynamics and its interaction with rolling stock*. Moscow: Transport Publ.; 1997. 325 p. (In Russ.)].
3. Савоськин А. Н., Бурчак Г. П., Бондаренко Д. А. Вероятностные методы в задачах динамики, прочности и безотказности рельсовых экипажей. М.: Альянс, 2022. 612 с. [Savos'kin A. N., Burchak G. P., Bondarenko D. A. *Probabilistic methods in problems of dynamics, strength and failure-free operation of rail cabs*. Moscow: Al'yans Publ.; 2022. 612 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/uuxpuw>.
4. Акишин А. А., Савоськин А. Н. Генерация многомерного случайного процесса возмущений в задачах динамики подвижного состава железных дорог // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, телекоммуникация и управление. 2015. № 2–3 (217–222). С. 71–78 [Akishin A. A., Savos'kin A. N. Generating a Multidimensional Perturbed Stochastic Process in Railways Rolling Stock Dynamics. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computing Telecommunication and Control*. 2015;(2-3):71-78. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.5862/JCSTCS.217-222.6>
5. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М.: ИПП «Куна», 2023. 280 с. [Kogan A. Ya. *Railway track dynamics and its interaction with rolling stock*. Moscow: IPP “Kuna”; 2023. 280 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/mdkaov>.
6. Коган А. Я., Загитов Э. Д., Полешчук И. В. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава. М.: РАС, 2016. 208 с. [Kogan A. Ya., Zagitov E. D., Poleshchuk I. V. *Random processes of interaction between track and rolling stock*. Moscow: RAS Publ.; 2016. 208 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/xcaoyob>.
7. Савоськин А. Н., Лавлинская Н. С. Проверка адекватности методики генерации случайного процесса возмущения колебаний рельсовых экипажей по импульсной характеристике формирующего фильтра // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 6. С. 327–336 [Savos'kin A. N., Lavlinskaya N. S. Checking the adequacy of the method for generating a random process of disturbance of oscillations of rail carriages to the impulse response of the forming filter. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(6):327-336. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-327-336>.
8. Матыаш И., Шилханек Я. Генератор случайных процессов с заданной матрицей спектральных плотностей // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. XXI. № 1. С. 29–35 [Matyash J., Shilkhaneck Ya. Generator of random processes with given matrix of spectral densities. *Avtomatika i telemekhanika*. 1960;21(1):29-35. (In Russ.)].
9. Бендат Дж. С., Пирсол А. Дж. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с. [Bendat Ju. S., Piersol A. G. *Measurement and analysis of random data*. Moscow: Mir Publ.; 1974. 464 p. (In Russ.)].
10. Xu L., Zhao Y., Li Zh., Yan B., Chen W. Random vibration analysis for train–track interaction from the aspect of uncertainty quantification. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2021;66:103158. <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2021.103158>.
11. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. В. Ф. Писаренко; предисл. А. М. Яглома. М.: Мир, 1972. Т. 2. 287 с. [Jenkins G., Watts D. *Spectral analysis and its applications*. Moscow: Mir Publ.; 1972. Vol. 2. 287 p. (In Russ.)].
12. Alotta G., Di Paola M., Pinnola F. P. Cross-correlation and cross-power spectral density representation by complex spectral moments. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2017;94:20-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.02.001>.

13. Di Paola M., Pinnola F. P. Riesz fractional integrals and complex fractional moments for the probabilistic characterization of random variables. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2012;29:149-156. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2011.11.003>.

14. Savoskin A., Lavlinskaya N. Spectral and cross-spectral densities expressions' refinement for rail vehicle oscillations. In: Tanaino I., Dzholdosheva T. (eds.) *E3S Web of Conferences. Vol. 402: International Scientific Siberian Transport Forum "TransSiberia 2023", 16–19 May 2023, Novosibirsk*. [s. l.]; 2023. p. 06001. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202340206001>.

15. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд., доп. и испр. М.: Физматгиз, 1962. 349 с. [Linnik Yu. V. *The least squares method and the mathematical statistical theory fundamentals of observation processing*. 2nd ed. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1962. 349 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН,

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

Наталья Сергеевна ЛАВЛИНСКАЯ,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOSKIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Electric Trains and Locomotives Department, Russian University of Transport (127994,

Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 528727, <https://orcid.org/0000-0001-9777-7235>

Nataliya S. LAVLINSKAYA,

Postgraduate, Electric Trains and Locomotives Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), <https://orcid.org/0000-0003-0937-3906>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич САВОСЬКИН. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, написание текста статьи (50 %).

Наталья Сергеевна ЛАВЛИНСКАЯ. Выполнение расчетов и редактирование текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoliy N. SAVOSKIN. Setting research goals and objectives, general research management, article writing (50 %).

Nataliya S. LAVLINSKAYA. Calculations and article editing (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.07.2023, рецензия от первого рецензента получена 04.08.2023, рецензия от второго рецензента получена 18.08.2023, принята к публикации 10.12.2023.

The article was submitted 27.07.2023, first review received 04.08.2023, second review received 18.08.2023, accepted for publication 10.12.2023.

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).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.063.7

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



Экспериментальная оценка возможностей теплового аккумулятора с целью использования в масляной системе дизеля маневрового тепловоза

А. А. Свечников✉, Ю. К. Мустафаев, И. В. Метальников

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Для увеличения времени холодного простоя тепловозов в зимнее время авторы предлагают использовать тепловые аккумуляторы в масляной системе. Цель исследования — оценить возможность использования тепловых аккумуляторов для повышения температуры порции прокачиваемого масла непосредственно перед запуском дизельного двигателя в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Материалы и методы. Объект исследования — тепловой аккумулятор, предполагаемый к использованию в составе масляной системы дизеля. Физический эксперимент проведен в лабораторных условиях на уменьшенной копии аккумулятора с дальнейшим масштабированием результатов на основе теории подобия на маневровый тепловоз. Регистрация параметров температуры осуществлялась в режиме реального времени с помощью автоматизированной системы измерения, собранной на базе микроконтроллера. Статистическая обработка результатов экспериментов выполнялась с помощью Microsoft Excel.

Результаты. Представлены результаты испытаний лабораторного образца теплового аккумулятора для моторного масла. Проведена оценка зависимостей температуры масла внутри теплового аккумулятора и внутри картера дизеля маневрового тепловоза от времени холодного простоя, что доказывает эффективность использования предложенных технических решений.

Обсуждение и заключение. Аккумулирование тепловой энергии рабочих жидкостей дизельного двигателя тепловоза является перспективным методом, повышающим эффективность предпусковой подготовки тепловозов в условиях отрицательных температур. Метод сохранения тепла, использующийся в тепловом аккумуляторе, является универсальным и может быть применен как для масла, так и для охлаждающей жидкости транспортных дизелей. Предполагаемым объектом применения тепловых аккумуляторов является маневровый тепловоз.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маневровый тепловоз, дизельный двигатель, масляная система, тепловой аккумулятор, фазовый переход, холодный простой, температура масла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Свечников А. А., Мустафаев Ю. К., Метальников И. В. Экспериментальная оценка возможностей теплового аккумулятора с целью использования в масляной системе дизеля маневрового тепловоза // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 40–49.

✉ aa.svechnikov@samgups.ru (А. А. Свечников)

Original article

UDK 629.4.063.7

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



Experimental evaluation of thermal accumulator capabilities for use in the oil system of shunter diesel motor

Alexandr A. Svechnikov✉, Yuriy K. Mustafaev, Ilya V. Metalnikov

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In order to increase the cold downtime of diesel locomotives in winter, the authors suggest using thermal accumulators in the oil system. The research considers using thermal accumulators to increase the temperature of the pumped oil portion immediately before starting the diesel motor in negative ambient temperatures.

Materials and methods. The research covers a thermal accumulator suggested for use as part of the diesel motor oil system. The researchers conducted a physical laboratory experiment on a reduced copy of the accumulator and scaled the results to a diesel shunter based on the similarity theory. The temperature parameters were recorded in real time using a microcontroller-based automated measurement system. Microsoft Excel was used for a statistical analysis of the experimental results.

Results. The tests results of the laboratory sample of the thermal accumulator for motor oil are presented. The authors evaluated the dependencies of the oil temperature inside the thermal accumulator and inside the crankcase of the shunter diesel motor on the cold downtime, which proves the effectiveness of the proposed technical solutions.

Discussion and conclusion. Accumulation of thermal energy of locomotive diesel motors service fluids is a promising method increasing the diesel locomotive pre-launch performance in negative temperatures. The heat preservation method used in the thermal accumulator is versatile and may be applied to both oil and cooling liquid of transport diesel motors. The authors propose to use thermal accumulators on diesel shunters.

KEYWORDS: diesel shunter, diesel motor, oil system, thermal accumulator, phase transition, cold downtime, oil temperature

FOR CITATION: Svechnikov A.A., Mustafaev Yu.K., Metalnikov I.V. Experimental evaluation of thermal accumulator capabilities for use in the oil system of shunter diesel motor. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):40-49. (In Russ.).

Введение. Общая протяженность эксплуатационной длины железнодорожных путей России составляет более 100 тыс. км. Каждая из 16 железных дорог России, разделенных по географическому признаку, находится в уникальной климатической зоне. На некоторых железных дорогах страны среднее время эксплуатации тепловозов при отрицательных температурах достигает более 40 % от общего эксплуатационного времени. На сегодняшний день полностью не решена проблема повышенного количества неплановых ремонтов тепловозов в зимний период по причинам преждевременного износа трибосопряжений деталей силовой установки. Не менее актуальной является задача повышения эффективности прогрева дизельных двигателей тепловозов в зимний период.

Статистический анализ расхода топлива маневровыми тепловозами в зимний период показывает, что в среднем на прогрев тратится 6–10 % от общего потребления на тяговые нужды, что говорит о высоком потенциале экономии топлива за счет повышения эффективности прогрева [1–3].

Вопрос повышения эффективности прогрева дизелей тепловозов в зимний период имеет длительную предысторию. На данную тему было выполнено большое количество исследований [4–6]. Многолетние труды ученых позволили наметить конкретные направления по совершенствованию вспомогательных систем тепловоза. Существующие на сегодняшний день системы прогрева тепловозов условно можно разделить на два типа: бортовые и стационарные. Особого внимания заслуживают системы, позволяющие эффективно использовать электрический подогрев [7], вторичные источники энергии (например, теплоту отработавших газов) [8], тепловые аккумуляторы [9, 10].

В последнее время начали появляться новые пути повышения эффективности прогрева. Так, например, применение элементов Пельтье [11] позволяет снизить расход топлива на прогрев на 3–5 %, а использование автономного источника в виде котла-подогревателя на природном газе [12] позволяет прогреть тепловоз более дешевым топливом — метаном.

Несмотря на большое количество научных исследований, в настоящее время повсеместного применения бортовых систем прогрева на тепловозах не наблюдается. Компания ООО «АВП Технология» нашла свой вариант решения — использование системы автоматического запуска дизеля тепловоза (САЗДТ) [13, 14]. Данной системой оборудуются маневровые тепловозы серии ТЭМ18ДМ. Одной из основных проблем использования САЗДТ является то, что ее сложно обслуживать и поддерживать в исправном состоянии. Из-за некачественного обслуживания в работе

системы могут происходить отказы, способные привести к замораживанию воды в системе охлаждения двигателя тепловоза и последующему неплановому ремонту.

Тепловые аккумуляторы можно использовать как дополнение к любому из известных способов повышения эффективности прогрева [15, 16]. Тепловой аккумулятор, наполненный теплоаккумулирующим материалом фазового перехода, является эффективным средством, работающим по принципу термоса и позволяющим накапливать, а потом отдавать тепловую энергию в масляную и водяную системы дизеля тепловоза.

Тепловые аккумуляторы могут быть использованы для увеличения времени холодного простоя тепловоза в зимнее время за счет увеличения времени остывания до критических температур, при которых требуется произвести запуск двигателя для его прогрева. Тем самым достигается экономия топлива за счет увеличения перерывов между горячим простоем, а также экономия ресурса двигателя за счет сокращения количества запусков в период простоя. Также тепловые аккумуляторы могут применяться для предпускового прогрева масла, прокачиваемого через масляную систему двигателя непосредственно во время процедуры запуска.

Таким образом, предполагаемая система предпусковой подготовки должна состоять из контура поддержания температуры водяной системы, а также контура прогрева масла перед запуском дизеля. Следует отметить, что конструкции тепловых аккумуляторов для водяной и масляной систем тепловоза должны быть различными. Для водяной системы предпочтительнее конструкция проточного типа, обеспечивающая непрерывную циркуляцию охлаждающей жидкости через тепловой аккумулятор в целях недопущения промерзания системы в критических местах. Для теплового аккумулятора моторного масла следует отдать предпочтение конструкции накопительного типа с обеспечением залпового прогрева предпусковой порцией масла. В данной статье представлены исключительно результаты экспериментальной оценки возможностей теплового аккумулятора масла.

Анализ имеющегося свободного пространства внутри машинного помещения маневровых тепловозов серий ТЭМ2, ЧМЭЗ, ТЭМ18ДМ показал конструктивную реализуемость данного метода, что в совокупности с вышесказанным говорит об актуальности исследований, направленных на оценку эффективности использования тепловых аккумуляторов на маневровых тепловозах.

Объектом исследования является тепловой аккумулятор, предполагаемый к использованию в составе

масляной системы дизельного двигателя маневрового тепловоза. В целях обеспечения широкого спектра исследований был изготовлен лабораторный образец теплового аккумулятора уменьшенного размера, оснащенный автоматизированной системой измерения температур теплоносителя. Лабораторный образец представляет собой тепловой аккумулятор фазового перехода накопительного типа с внутренним теплообменником. В качестве теплоаккумулирующего материала использовался церезин 80Н (ГОСТ 2488–79¹).

Целью исследования является экспериментальная оценка возможностей использования тепловых аккумуляторов для повышения температуры порции прокачиваемого масла непосредственно перед запуском дизельного двигателя в условиях отрицательных температур окружающей среды.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические задачи:

- подобрано свободное пространство в машинном помещении маневрового тепловоза для размещения теплового аккумулятора моторного масла;
- создана лабораторная установка и разработан порядок проведения экспериментальной работы;
- проведены испытания образца теплового аккумулятора в условиях научно-исследовательской лаборатории при температурах окружающей среды в диапазоне от -20 до $+25$ °C;
- спрогнозированы результаты работы теплового аккумулятора в масляной системе маневрового тепловоза;
- даны практические рекомендации по использованию тепловых аккумуляторов на маневровых тепловозах.

Для конструктивной проработки теплового аккумулятора моторного масла важной задачей стал подбор свободного пространства в машинном помещении маневрового тепловоза и определение места размещения устройства. В результате решения данной задачи было проанализировано свободное пространство внутри машинного помещения маневровых тепловозов серии ЧМЭЗ, ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ.

Как показал анализ свободного пространства в машинном помещении кузова тепловоза, наиболее подходящим местом размещения является пространство сбоку от дизеля (в его нижней части) со стороны масляного теплообменника. Габаритные размеры (с небольшим запасом по пространству), в которые необходимо вписать тепловой аккумулятор масла, составляют в длину 2100 мм, в высоту — 550 мм,

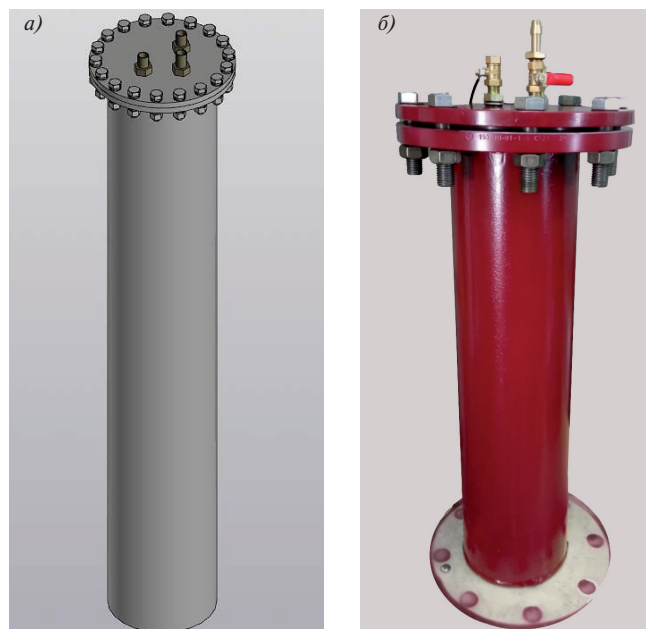


Рис. 1. Общий вид теплового аккумулятора моторного масла:
а — проектируемый тепловозный тепловой аккумулятор;
б — лабораторный образец уменьшенного масштаба

Fig. 1. General view of the motor oil thermal accumulator:
a — diesel locomotive thermal accumulator under design;
b — reduced laboratory sample

в ширину — 350 мм. При прямоугольном сечении полный объем теплового аккумулятора будет равен 404 дм^3 , при круглом сечении — 200 дм^3 .

Производительность штатного маслопрокачивающего насоса, установленного на маневровых тепловозах, равна $1,2 \text{ дм}^3/\text{с}$. Прокачка масла перед запуском дизеля осуществляется в течение 30 с, значит, для прокачки необходимо минимум 36 дм^3 масла. В тепловом аккумуляторе необходимо иметь как минимум двукратный запас масла. Таким образом, при объеме 100 дм^3 моторного масла гарантированно хватит для прокачки разогретого масла перед запуском дизеля. Круглое сечение теплового аккумулятора предпочтительней, как наиболее эргономичное с точки зрения эксплуатации и обслуживания, имеющее меньшую эффективную площадь рассеивания тепла и обеспечивающее большую прочность.

Предположительные габаритные размеры теплового аккумулятора масла: длина — 2100 мм; внешний диаметр — 350 мм; диаметр емкости с маслом — 300 мм. Внешний вид теплового аккумулятора масла для маневрового тепловоза представлен на рис. 1, а.

¹ ГОСТ 2488–79. Церезин. Технические условия [Электронный ресурс]: дата введения 1981-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008613/titles> (дата обращения: 30.11.2023).

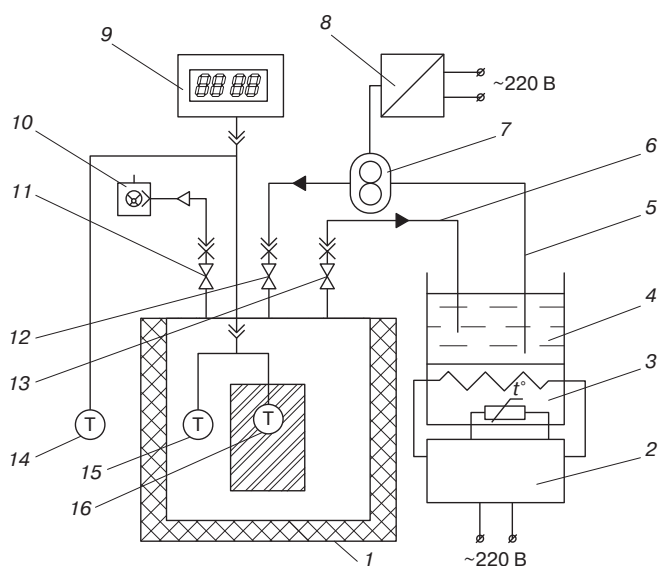


Рис. 2. Схема лабораторного стенда с установленным на него тепловым аккумулятором:

1 — тепловой аккумулятор; 2 — терморегулятор; 3 — нагревательный элемент; 4 — емкость с моторным маслом; 5 — подающая (всасывающая) магистраль масла; 6 — обратная (возвратная) магистраль масла; 7 — шестеренчатый маслонасос; 8 — блок питания насоса; 9 — устройство индикации и регистрации температуры; 10 — вакуумный насос; 11 — запорный кран вакуумной магистрали; 12 — запорный кран обратной магистрали; 13 — запорный кран подающей магистрали; 14 — датчик температуры окружающей среды; 15 — датчик температуры масла в тепловом аккумуляторе; 16 — датчик температуры теплоаккумулирующего материала

Fig. 2. Diagram of the laboratory bench with the installed thermal accumulator:

1 — thermal accumulator; 2 — heat controller; 3 — heating element; 4 — motor oil tank; 5 — oil charging (suction) line; 6 — oil return (recirculation) line; 7 — geared oil pump; 8 — pump power supply; 9 — temperature recorder and indicator; 10 — vacuum pump; 11 — vacuum line shut-off valve; 12 — return line shut-off valve; 13 — supply line shut-off valve; 14 — ambient temperature sensor; 15 — thermal accumulator oil temperature sensor; 16 — heat storing medium temperature sensor

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились в условиях научно-исследовательской лаборатории СамГУПС «Газомоторное и водородное топливо» на масштабном образце теплового аккумулятора с объемом масла 8 дм³ (рис. 1, б).

Для оценки эффективности работы лабораторного образца теплового аккумулятора моторного масла в различных температурных условиях был проведен комплекс физических экспериментов. Физический (натурный) эксперимент является наиболее ответственным этапом инженерного анализа, так как именно с помощью эксперимента окончательно подтверждаются или опровергаются выдвинутые гипотезы. Другими словами, эксперимент выполняет контрольные функции.

Одной из главных целей проведения эксперимента является получение недостающей информации о соответствии объекта испытаний (лабораторного образца теплового аккумулятора) предъявляемым к нему требованиям эффективного сохранения тепла рабочего тела при воздействии отрицательных температур.

Кроме планирования и непосредственно проведения экспериментов, важным этапом является статистическая обработка результатов экспериментальных исследований, которая выполнялась с использованием автоматизированных средств — электронных таблиц Microsoft Excel.

Таким образом, методы исследования сочетают в себе физический эксперимент, проведенный в лабораторных условиях, с дальнейшим масштабированием результатов на основе теории подобия на маневровый тепловоз. Регистрация параметров температуры осуществлялась в режиме реального времени с помощью автоматизированной системы измерения, собранной на базе микроконтроллера.

Для проведения физических экспериментов собран лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 2.

Стенд отвечает следующим требованиям и возможностям:

- обеспечивает регистрацию параметров температуры рабочих тел теплового аккумулятора (масла и теплоаккумулирующего материала) и температуры окружающей среды в режиме реального времени;
- обеспечивает процесс зарядки теплового аккумулятора прокачкой масла при постоянной температуре масла в 80 °С;
- имеет защиту от перегрева масла;
- обеспечивает возможность создания отрицательной температуры окружающей среды (от –20 °С);
- обеспечивает возможность перекрытия входного и выходного патрубков масла;
- обеспечивает возможность создания вакуума в межстенном пространстве теплового аккумулятора;
- является безопасным для персонала, проводящего испытания.

Порядок проведения испытаний

1. Подключить тепловой аккумулятор к испытательному стенду при помощи гибких шлангов.
2. Нагреть моторное масло до температуры 80–85 °С.
3. Зарядить тепловой аккумулятор путем прокачки через него горячего масла. Тепловой аккумулятор считается полностью заряженным при достижении температуры теплоаккумулирующего вещества 80–85 °С.
4. Прекратить нагрев масла, остановить прокачку через тепловой аккумулятор и перекрыть входной, выходной патрубки с помощью шаровых кранов.
5. Поместить тепловой аккумулятор в морозильный ларь.

6. Произвести замеры и регистрацию температур рабочих жидкостей в режиме реального времени (каждые 60 с) в течение не менее 10 ч.

7. Повторить данные действия при различных температурах окружающей среды в диапазоне от -20 до -12 °C.

По результатам испытаний построить график зависимости температуры рабочих тел от времени при холодном простое теплового аккумулятора, аппроксимировать результаты испытаний к условиям работы аккумулятора при различной температуре окружающей среды.

При проведении исследований использовалось моторное масло марки М-14В2. В качестве теплоаккумулирующего материала, как уже отмечалось, использовался церезин 80Н (ГОСТ 2488–79²).

Результаты исследования. Результаты проведенных испытаний работы лабораторного образца теплового аккумулятора масла в условиях отрицательных температур окружающей среды представлены на рис. 3.

Так как интенсивность падения температуры напрямую зависит от разности температур между рабочим телом и окружающей средой, прогнозные кривые (2 и 3) на рисунке получены путем смещения экспериментальной кривой для температуры -20 °C на величину Δt , равную разнице между температурой прогноза и температурой эксперимента, вверх по оси ординат и влево до совпадения с начальной точкой графика 80 °C на оси ординат при нулевом времени. Адекватность применяемого алгоритма пересчета подтверждается практически полным совпадением (расхождение не более 2%) экспериментальной кривой, полученной для температуры окружающей среды $+26$ °C, и прогнозной кривой для температуры $+26$ °C путем ее пересчета из экспериментальной кривой, полученной при температуре -20 °C.

На следующем этапе проведения исследования выполнено построение модели, позволяющей прогнозировать температуру масла внутри полноразмерного теплового аккумулятора объемом 100 дм³ путем применения теории подобия на основе данных, полученных на лабораторном образце. Построение прогнозной модели осуществлялось следующим образом.

На начальном этапе построения прогнозной модели были проведены лабораторные исследования по выявлению влияния объема масла на интенсивность падения температуры. Основой данных исследований являлось измерение температуры масла (при использовании разного объема) при холодном простое.

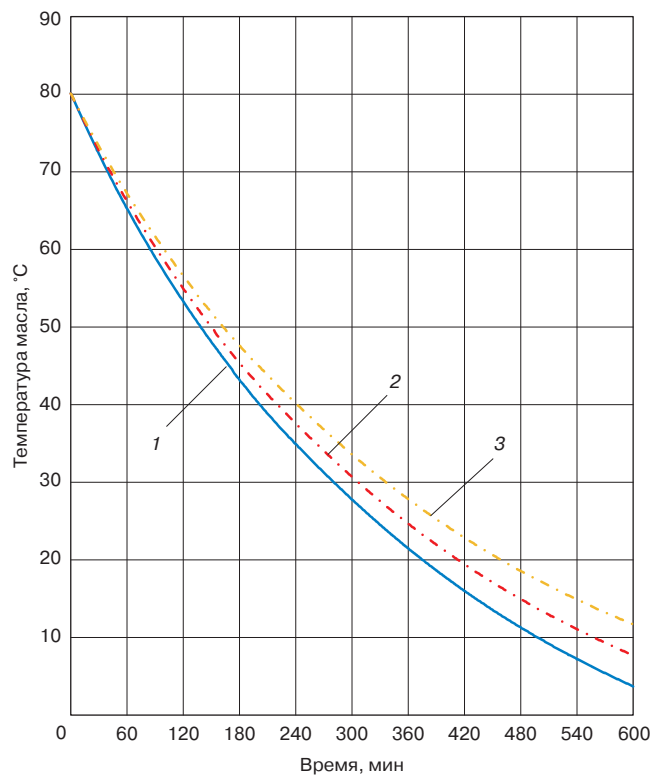


Рис. 3. Зависимость температуры масла внутри теплового аккумулятора от времени холодного простоя:

1 — минус 20 °C (эксперимент);
2 — минус 15 °C (прогноз); 3 — минус 10 °C (прогноз)

Fig. 3. Oil temperature dependence inside the thermal accumulator on cold downtime:

1 — minus 20 °C (experimental);
2 — minus 15 °C (forecast); 3 — minus 10 °C (forecast)

Прогнозная модель построена с использованием экспериментальных зависимостей для $0,5$; 2 и 10 дм³. С использованием инструментов Microsoft Excel выполнен регрессионный анализ: получена линия тренда с уравнением зависимости в виде полинома, при помощи которой описана закономерность остывания масла (время в процентах от базового, принятого для объема $0,5$ дм³ по оси x) в зависимости от его объема в литрах (ось y), что позволило эмпирическим путем получить коэффициенты подобия. График зависимости с полученным уравнением регрессии представлен на рис. 4.

Выявленные закономерности позволили построить прогнозную характеристику температуры масла (рис. 5), находящегося внутри теплового аккумулятора тепловоза, за счет экстраполяции экспериментальных данных работы лабораторного теплового аккумулятора (кривая 1) на объем 100 дм³ (кривая 3) и сравнить ее

² Там же. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008613/titles> (дата обращения: 30.11.2023).

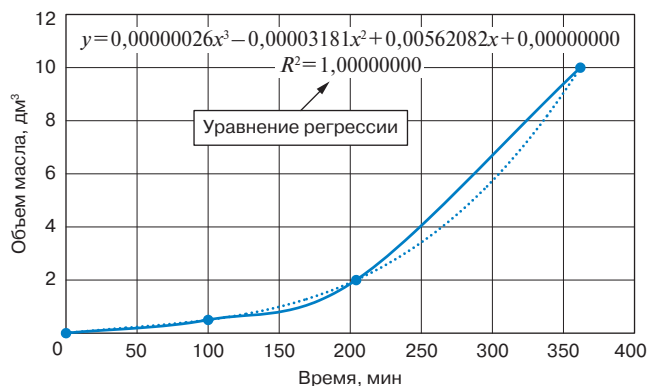


Рис. 4. Результаты построения прогнозной модели в Microsoft Excel

Fig. 4. Microsoft Excel projection simulation results

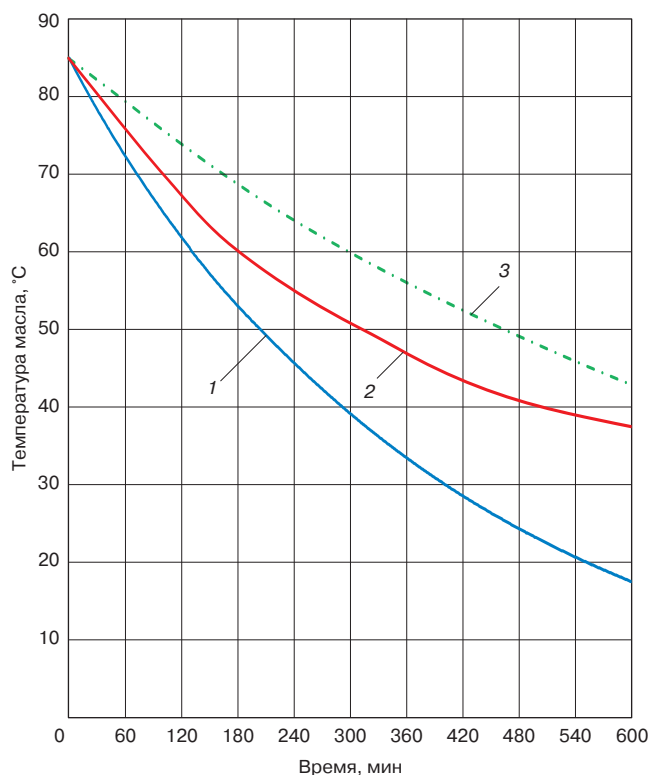


Рис. 5. Зависимость температуры масла от времени при различных объемах (температура окружающей среды -4°C): 1 — тепловой аккумулятор 8 dm^3 (эксперимент); 2 — картер дизеля 550 dm^3 (эксперимент); 3 — тепловой аккумулятор 100 dm^3 (экстраполяция)

Fig. 5. Oil temperature dependence on time at different volumes (ambient temperature -4°C): 1 — thermal accumulator 8 dm^3 (experimental); 2 — diesel crankcase 550 dm^3 (experimental); 3 — thermal accumulator 100 dm^3 (extrapolation)

с кривой падения температуры масла в картере дизеля (кривая 2). Полученные зависимости построены для температуры окружающей среды, равной -4°C .

Кривая 2 была получена путем снятия показателей температуры тепловоза ТЭМ18ДМ по данным АПК «Борт» в момент холодного простоя [17]. Следует отметить, что при предварительном горячем простое на холостом ходу температура масла находилась в диапазоне $60\text{--}65^{\circ}\text{C}$, поэтому кривая 2 графика была построена с использованием прогнозной модели до максимальной рабочей температуры масла в 85°C , предусмотренной технической документацией тепловоза. До такой же температуры осуществлялись зарядка лабораторного образца и пересчет характеристики для проектируемой полноразмерной модели теплового аккумулятора.

Результаты проведенных экспериментов показали, что температура масла внутри тепловозного теплового аккумулятора спустя 3 ч холодного простоя (-4°C окружающей среды) составила 69°C . При этом температура масла в картере дизеля тепловоза в этих же условиях, как следует из результатов расчета, будет составлять 60°C , сохраняя разницу температур в $8\text{--}9^{\circ}\text{C}$ до 8 ч (см. рис. 5), а остывание масла в полноразмерном тепловом аккумуляторе до 60°C произойдет через 5 ч, что дает прирост времени холодного простоя более чем на 60 %. Из сказанного выше следует вывод о целесообразности использования средств аккумулирования тепла рабочих жидкостей дизеля тепловоза.

Результаты экспериментальных исследований лабораторного образца теплового аккумулятора проводились при участии представителей Куйбышевской дирекции тяги, что подтверждено протоколом испытаний.

Обсуждение и заключение. Аккумулирование тепла рабочих жидкостей дизеля тепловоза является перспективным методом, повышающим эффективность предпусковой подготовки тепловозов в условиях отрицательных температур. Метод сохранения тепла, использующийся в тепловом аккумуляторе, является универсальным и может быть применен как для масла, так и для охлаждающей жидкости транспортных дизелей. Предполагаемым объектом применения тепловых аккумуляторов является маневровый тепловоз.

По результатам проведенного исследования следует заключить, что при температуре окружающей среды, равной -4°C , использование теплового аккумулятора позволяет осуществить прокачку масла при пуске дизеля с повышенной температурой (на $14\text{--}16\%$), по сравнению с температурой масла в картере, либо обеспечить большую длительность холодного простоя (на $50\text{--}60\%$) при одинаковой конечной температуре остывания моторного масла.

Использование только масляного теплового аккумулятора в составе дизеля позволит снизить износ трибосопряжений деталей дизельной установки,

однако не решит задачу повышения эффективности прогрева тепловоза. Для увеличения времени холодного простоя тепловоза и, как следствие, снижения расхода топлива на прогрев необходимо применять комплексную систему предпусковой подготовки. Такая система должна иметь возможность аккумулировать тепло моторного масла и тепло воды из системы охлаждения, а также осуществлять кратковременный подогрев воздушного заряда в момент пуска дизеля при отрицательных температурах окружающей среды.

Если моторное масло при холодном простое тепловоза полностью стекает в картер дизеля и хранится полным объемом, а вода остается распределенной по различным элементам системы охлаждения, то концепция применения теплового аккумулятора для воды должна отличаться. Важно учитывать тот факт, что вода в системе охлаждения остывает с разной интенсивностью, есть быстро замерзающие участки, такие как труба отвода от калорифера и нижние патрубки секций радиатора. Поэтому система накопления сохранения тепловой энергии воды контура охлаждения двигателя должна соответствовать следующей концепции (следующим требованиям):

1) для теплового аккумулятора воды рекомендуется конструкция с внешним теплоаккумулирующим материалом и прокачкой охлаждающей жидкости через теплообменник, расположенный в теплоаккумулирующем материале;

2) при холодном простое тепловоза необходимо обеспечить периодическую прокачку воды с подмешиванием горячей воды, проходящей через контур теплового аккумулятора, и контролем температур на выходе из зон локального замерзания (отвод калорифера и нижний патрубок секций холодильника), при необходимости увеличивая время прокачки горячей воды из теплообменника теплового аккумулятора;

3) перед пуском дизеля тепловоза необходимо осуществлять прокачку не только масла, но и воды из теплового аккумулятора.

Перспективами дальнейшего повышения эффективности аккумулирования тепла рабочих жидкостей дизеля тепловоза является использование вакуумного слоя в межстенном пространстве тепловых аккумуляторов и разработка алгоритма интеллектуальной работы системы предпусковой подготовки тепловоза, учитывающего фактическую температуру воды в локальных участках системы охлаждения.

Благодарности: авторы выражают благодарность ОАО «РЖД» за финансовую поддержку и Куйбышевской дирекции тяги за содействие в проведении экспериментов.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to JSC "Russian Railways" for financial support and the Kuibyshev Traction Directorate for assistance in conducting experiments.

Финансирование: представленные в статье материалы получены в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте. Договор о выплате гранта от 26 декабря 2022 г. № 5103675 «Тепловой аккумулятор системы предпусковой подготовки тепловозов в холодное время года».

Finding: the materials presented in the article were obtained as part of the implementation of a grant from Russian Railways for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport. The agreement on the payment of grant No. 5103675 dated December 26, 2022 "Thermal accumulator of the system of pre-start preparation of locomotives in the cold season".

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. Чулков А. В., Носков В. О., Логинова Е. С. Влияния режимов работы маневровых тепловозов на расход топлива // *WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS*: сб. статей XXVII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 25 декабря 2018 г.: в 2 ч. Пенза: Наука и Просвещение, 2018. Ч. 1. С. 72–77 [Chulkov A. V., Noskov V. O., Loginova E. S. The influence of the modes of operation of shunting locomotives on the fuel consumption. In: *WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: XXVII International scientific conference, 25 December 2018, Penza*. Penza: Nauka i Prosveshcheniye Publ.; 2018. Vol. 1. p. 72–77 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ysioep>.
2. Белоглазов А. К., Носков В. О., Чулков А. В. Влияние температуры окружающей среды на работу системы охлаждения тепловоза и его агрегатов // *Известия Транссиба*. 2015. № 4(24). С. 11–17 [Beloglazov A. K., Noskov V. O., Chulkov A. V. Ambient temperature of the cooling system on diesel and units. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2015;(4):11–17. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25444195>.
3. Анисимов А. С., Белоглазова Н. А., Носков В. О. Экспериментальные исследования режимов охлаждения и прогрева водяной системы тепловоза // *Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы Пятой Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвященной 75-летию победы в Великой Отечественной войне, 85-летию кафедры "Подвижной состав электрических железных дорог", 120-летию основания Омского гос. ун-та путей сообщения, Омск, 12 ноября 2020 г.* Омск: ОмГУПС, 2020. С. 28–35 [Anisimov A. S., Beloglazova N. A., Noskov V. O. Experimental studies of cooling and heating modes of the water system of a locomotive. In: *Operational Reliability of the Locomotive Fleet and Improvement of Train Traction Efficiency: Proceedings of the Fifth All-Russian scientific and technical conference with international participation, dedicated to 75th Anniversary of the victory in the Great Patriotic War, 85th Anniversary of the Electrical Railway Rolling Stock Department, 120th Anniversary of the founding of the Omsk State Transport University, 12 November 2020, Omsk*. Omsk: Omsk State Transport University; 2020. p. 28–35. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/exiwqo>.
4. Балабин В. Н. О повышении эффективности прогрева двигателей тепловозов // *Железнодорожный транспорт*. 2022. № 11. С. 31–35 [Balabin V. N. Improving diesel locomotive warming-up performance. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2022;(11):31–35. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rsmmaa>.

5. Андрончев И. К., Саламатин М. А. Методика адаптации прогрева маневрового тепловоза к условиям изменения наружного воздуха // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 58–59 [Andronchev I. K., Salamat M. A. Adaptation methods of diesel shunter warm-up to outdoor air change. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2010;(7):58–59. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ouuyucb>.
6. Овчаренко С. М., Ринг И. С. Перспективы развития технологий прогрева тепловозов в зимний период // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф., посвящен. Дню Российской науки, Омск, 8 февраля 2021 г. Омск: ОмГУПС, 2021. С. 77–82 [Ovcharenko S. M., Ring I. S. Prospects for development of technologies for heating locomotive in the winter period. In: *Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport: Proceedings of the scientific conference dedicated to the Russian Science Day, 8 February 2021, Omsk*. Omsk: Omsk State Transport University; 2021. p. 77–82. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/dzinte>.
7. Бакыт Г. Б., Бисенгалиев А. Б., Кажуан М. Н. Система поддержания теплового состояния дизеля тепловоза с помощью электрического подогрева // Молодежь в науке: новые аргументы: VI междунар. молодеж. сб. науч. ст., Липецк, 28 апреля 2020 г. / отв. ред. А. В. Горбенко. Липецк: Аргумент, 2020. С. 20–23 [Bakyt G. B., Bisengaliyev A. B., Nazhuan M. N. System of maintaining the thermal state of locomotive diesel motor by means of electric heating. In: Gorbenko A. V. (editor-in-chief) *Youth in Science: New Arguments: VI International collection of young scientific articles, 28 April 2020, Lipetsk*. Lipetsk: Argument Publ.; 2020. p. 20–23 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/qyeiyt>.
8. Носырев Д. Я., Чертыковцева Н. В. Применение вторичных источников энергии для повышения эффективности эксплуатации маневровых тепловозов в зимнее время // Вестник транспорта Поволжья. 2009. № 3 (19). С. 14–18 [Nosyrev D. Ya., Chertykovtseva N. V. Secondary sources of energy as a way to improve the efficiency of diesel shunters' operation in the winter. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2009;(3):14–18. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/kuxfjx>.
9. Кривошеев В. Е., Чепец В. Ю. Методика расчета бака-аккумулятора теплоты для системы автономного подогрева дизеля маневрового тепловоза // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2012. № 3 (47). С. 148–151 [Krivosheyev V. E., Chepets V. Yu. Design procedure of the storage container of warmth for the system of independent heating of the diesel engine for shunting locomotives. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2012;(3):148–151. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/pcisxd>.
10. Свечников А. А., Крючкова А. А. Тепловой аккумулятор как средство стабилизации температурных режимов наддувочного воздуха и рабочих жидкостей дизеля тепловоза // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 1 (73). С. 23–28 [Svechnikov A. A., Kryuchkova A. A. Thermal accumulator as a way to stabilise the temperature modes of charge air and service fluids of a locomotive diesel motor. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2019;(1):23–28. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/inycch>.
11. Прогрев тепловозного дизеля с помощью элементов Пельтье / В. В. Молчанов [и др.] // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование — наука — производство: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Чита, 7–8 декабря 2017 г. Чита: Забайкальский ин-т ж.-д. транспорта — филиал Иркутского ун-та путей сообщения, 2017. Т. 1. С. 87–93 [Molchanov V. V., Beloglazov A. K., Noskov V. O., Solyanik N. S. Warming-up diesel locomotive diesel engine using Peltier elements. In: *115th Anniversary of Railway Education in Zabaikalye: Education — Science — Manufacture: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, 7–8 December 2017, Chita*. Chita: Zabaikalsky Institute of Railways transport — branch of the Irkutsk University of Transport; 2017. Vol. 1. p. 87–93 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zmfzla>.
12. Сотченков А. В., Истомин В. С. Использование автономного источника на природном газе для прогрева локомотивов // Инновации и инвестиции. 2019. № 7. С. 165–166 [Sotchenkov A. V., Istomin V. S. The use of an independent source of natural gas for heating of locomotives. *Innovation & Investment*. 2019;(7):165–166. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/igeqzt>.
13. Абрамов О. В., Кашенко А. А. Система автоматического запуска и остановки дизеля для тепловозов // Локомотив. 2017. № 2 (722). С. 34–35 [Abramov O. V., Kashchenko A. A. Locomotive diesel automatic start-stop system (SAZDT). *Lokomotiv*. 2017;(2):34–35. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xwpwcp>.
14. Харькин А. С. Экономический эффект внедрения САЗДТ на маневровом локомотиве // Труды 81-й студенческой научно-практической конференции РГУПС, Воронеж, 28–29 апреля 2022 г. Воронеж: филиал РГУПС, 2022. Ч. 4. С. 50–55 [Harkin A. S. Economic effect of introducing a locomotive diesel automatic start-stop system (SAZDT) on a shunting locomotive. In: *Proceedings of the 81st student scientific and practical conference of RGUPS, 28–29 April 2022, Voronezh*. Voronezh: RGUPS Branch; 2022. Part 4. p. 50–55. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ekduen>.
15. Svechnikov A. A., Mutayev M. A. The use of phase transition heat accumulators for pre-start preparation of diesel locomotives. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2476(1):020052. <https://doi.org/10.1063/5.0103085>.
16. Свечников А. А., Метальников И. В. Перспективы совершенствования масляной системы дизелей тепловозов // Наука и образование транспорта. 2018. № 1. С. 66–68 [Svechnikov A. A., Metal'nikov I. V. Prospects of improving the oil system of locomotive diesel motors. *Science and education of transport*. 2018;(1):66–68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yzafvr>.
17. Свечников А. А., Метальников И. В. Исследование интенсивности падения температур рабочих жидкостей дизеля маневрового тепловоза // Транспортная наука и инновации: материалы междунар. науч.-практ. конф., Самара, 1–2 июня 2023 г. / Самарский гос. ун-т путей сообщения. Самара: СамГУПС, 2023. С. 62–65 [Svechnikov A. A., Metal'nikov I. V. A research of service fluid temperature reduction intensity in shunter diesel motors. In: *Transport Science and Innovation: Proceedings of the international scientific and practical conference, 1–2 June 2023, Samara*. Samara: Samara State Transport University; 2023. p. 62–65. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rmbllx>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович СВЕЧНИКОВ, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры тягового подвижного состава, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), Author ID: 663061, <https://orcid.org/0000-0003-3285-568X>

Юрий Кямалович МУСТАФАЕВ, канд. техн. наук, доцент кафедры механики и инженерной графики, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В), Author ID: 647668, <https://orcid.org/0009-0003-4003-9110>

Илья Владимирович МЕТАЛЬНИКОВ, старший преподаватель, кафедра механики и инженерной графики, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В); Author ID: 1020476, <https://orcid.org/0009-0002-2275-6688>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandr A. SVECHNIKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Traction Rolling Stock Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 663061, <https://orcid.org/0000-0003-3285-568X>

Yuriy K. MUSTAFAEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 663061, <https://orcid.org/0009-0003-4003-9110>

Ilya V. METALNIKOV,

Senior Lecturer, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 1107392, 1020476, <https://orcid.org/0009-0002-2275-6688>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Александрович СВЕЧНИКОВ. Анализ результатов исследований других авторов, создание лабораторного образца теплового аккумулятора. Планирование и проведение физического эксперимента по оценке эффективности хранения тепла внутри лабораторного образца теплового аккумулятора. Подготовка и редактирование текста статьи (40%).

Юрий Кямалович МУСТАФАЕВ. Создание лабораторной установки, в том числе сборка и настройка измерительной части. Построение прогнозной модели на основе теории подобия в Microsoft Excel, позволяющей масштабировать результаты исследований на маневровый тепловоз (40%).

Илья Владимирович МЕТАЛЬНИКОВ. Статистическая обработка результатов эксперимента в Microsoft Excel, в том числе построение зависимостей, анализ и интерпретация результатов (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexandr A. SVECHNIKOV. Analysis of other authors research results, creation of a laboratory sample of the thermal accumulator. Planning and conducting the physical experiment to evaluate the heat storage performance inside the thermal accumulator laboratory sample. Article drafting and editing (40%).

Yuriy K. MUSTAFAEV. Creation of the laboratory setup, including assembly and adjustment of the measuring part. Building of forecast model based on the similarity theory in Microsoft Excel to scale the research results to a diesel shunter (40%).

Ilya V. METALNIKOV. Statistical processing of the experimental results in Microsoft Excel, including the construction of dependencies, results analysis and interpretation (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023, рецензия от первого рецензента получена 26.12.2023, рецензия от второго рецензента получена 12.01.2024, принята к публикации 26.01.2024.

The article was submitted 04.12.2023, first review received 26.12.2023, second review received 12.01.2024, accepted for publication 26.01.2024.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

СИСТЕМА ОПОВЕЩЕНИЯ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА О ПРИБЛИЖЕНИИ ПОЕЗДА

В. В. Седов, Д. Е. Щелобов, И. А. Зайцев,
А. В. Каменев, О. А. Макарычева

Заявляемое устройство относится к средствам определения приближения подвижного состава к месту установки средства автоматического контроля технического состояния подвижного состава и местам проведения работ на железнодорожных путях с оповещением работающего на путях персонала. Устройство включает блок обработки информации, соединительную панель, световой информатор номера занятого пути, световой информатор направления движения поезда, речевой информатор приближения поезда/звуковой сигнализатор исправности устройства, звуковой сигнализатор приближения поезда/исправности устройства, концевой выключатель, датчики определения

месторасположения поезда на путях участка контроля. Блок обработки информации содержит кнопку подтверждения, регистратор событий, плату процессора, входную плату, плату индикации, звуковой модуль, выходную плату, плату блока питания и плату фильтров. Устройство выполнено с возможностью контроля свободности участка, имеющего до четырех путей. Достигается повышение надежности и достоверности оповещения.

Патент на изобретение RU 2803222 C1, 11.09.2023.

Заявка № 2023106373 от 17.03.2023.

<https://elibrary.ru/item.asp?id=54659519>

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4:620.179.162

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

Сравнительный анализ чувствительности ультразвукового контроля при применении прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей различных производителей на примере дефектоскопа УД2-102 «Пеленг»

А. Г. Отока¹✉, О. В. Холодилов²¹ Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги»,
Гомель, Республика Беларусь² Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
Гомель, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. На железнодорожном транспорте ультразвуковой контроль является одним из основных методов выявления дефектов типа нарушения сплошности (трещины, поры и другие) как в основном металле, так и в сварных соединениях различных объектов. К средствам ультразвукового контроля прежде всего относят дефектоскоп с пьезоэлектрическими преобразователями. Пьезоэлектрические преобразователи поставляются, как правило, в комплекте с дефектоскопом в зависимости от версии общего или специализированного назначения. Зачастую изготовитель дефектоскопа предлагает заказчику свой комплект поставки пьезоэлектрических преобразователей под ту или иную версию прибора с установленным программным обеспечением, ссылаясь на то, что пьезоэлектрический преобразователь других производителей не согласуется с электронным блоком. Целью статьи является проведение сравнительного анализа чувствительности ультразвукового контроля с применением прямых и наклонных преобразователей различных производителей, а также сопоставление полученных результатов с чувствительностью контроля при использовании пьезоэлектрических преобразователей, которые традиционно применяются на железной дороге.

Материалы и методы. Приведены результаты испытания образца при помощи дефектоскопа УД2-102 «Пеленг» производства ООО «Алтек». В качестве контактной жидкости применялось индустриальное масло И-20. Сравнивались пьезоэлектрические преобразователи: прямые (производства ООО «Алтек» и НПО «ИНАКОН» (РФ)) и наклонные (ООО «Алтек» (РФ), ООО «Искатель-2» (РФ) и SIUI (КНР)).

Результаты. Приведены результаты эксперимента по выявлению искусственных отражателей в виде сквозных цилиндрических боковых отверстий в образце из стали 20ГЛ прямыми и наклонными пьезоэлектрическими преобразователями различных производителей с использованием дефектоскопа УД2-102 «Пеленг».

Обсуждение и заключение. Подключение преобразователей других производителей к дефектоскопу УД2-102 «Пеленг» ООО «Алтек» подтвердило тот факт, что они согласуются с электронным блоком. Таким образом, при наличии широкого выбора пьезоэлектрических преобразователей от различных производителей требованием согласования с электронным блоком дефектоскопа УД2-102 «Пеленг» можно пренебречь. При этом важно, чтобы производитель оговаривал совместное использование его продукта с другими типами дефектоскопов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вагоны, локомотивы, дефектоскоп ультразвуковой, пьезоэлектрический преобразователь, чувствительность, отражатель, прямой и наклонный преобразователь, угол ввода, цилиндрический боковой искусственный отражатель

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Отока А. Г., Холодилов О. В. Сравнительный анализ чувствительности ультразвукового контроля при применении прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей различных производителей на примере дефектоскопа УД2-102 «Пеленг» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 50–58.

✉ otokaa@mail.ru (А. Г. Отока)

© Отока А. Г., Холодилов О. В., 2024

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4:620.179.162

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

Comparative analysis of ultrasonic control sensitivity in using straight and angle piezoelectric transducers of different manufacturers on the example of flaw detector UD2-102 Peleng

Alexander G. Otoka¹✉, Oleg V. Kholodilov²¹ Gomel carriage depot RUP «Gomel branch Belarusian Railway»,
Gomel, Republic of Belarus² Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Railway transport has ultrasonic control as one of the main methods of detection of defects of the type of continuity violation (cracks, pores and others) both in the base metal and in weld seams of various items. Ultrasonic control tools primarily include a flaw detector with piezoelectric transducers. Piezoelectric transducers are usually supplied with the flaw detector depending on the general or specialised configuration. Flaw detector manufacturers often offer the customer their own piezoelectric transducer kits for certain device configurations with installed software referring to incompatibility of other manufacturers piezoelectric transducers with the electronic unit. The article is intended to carry out a comparative analysis of ultrasonic control sensitivity using straight and angle transducers of different manufacturers, and to compare the results with the control sensitivity using piezoelectric transducers traditionally used on the railways.

Materials and methods. The paper gives the results of testing the sample using Flaw Detector UD2-102 Peleng produced by Altek LLC. Industrial oil I-20 was used as a contact fluid. The authors compared the following piezoelectric transducers: straight (made by Altek LLC and NPO INAKON (Russia)) and angle (Altek LLC (Russia), Iskatel-2 LLC (Russia) and SIUI (China)).

Results. The paper reports the results of an experiment detecting artificial reflectors in the form of through cylindrical side holes in a sample of 20GL steel by straight and angle piezoelectric transducers of different manufacturers using Flaw Detector UD2-102 Peleng.

Discussion and conclusion. Connection of other manufacturers transducers to Flaw Detector UD2-102 Peleng of Altek LLC confirmed that they are compatible with the electronic unit. Thus, given the choice of a wide selection of piezoelectric converters from various manufacturers, the requirement of coordination with the electronic unit of Flaw Detector UD2-102 may be neglected. At the same time, it is important that the manufacturer stipulates the joint use of its product with other types of flaw detectors.

KEYWORDS: cars, locomotives, ultrasonic flaw detector, piezoelectric transducer, sensitivity, reflector, straight and angle transducer, insertion angle, cylindrical lateral artificial reflector

FOR CITATION: Otoka A. G., Kholodilov O. V. Comparative analysis of ultrasonic control sensitivity in using straight and angle piezoelectric transducers of different manufacturers on the example of flaw detector UD2-102 Peleng. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):50-58. (In Russ.).

Введение. Чувствительность диагностической системы ультразвукового контроля является важнейшим параметром, определяющим достоверность и воспроизводимость ее результатов. Основное влияние на эксплуатационные качества диагностической системы оказывают характеристики и настройки измерительного прибора, а также свойства материала и условия контакта преобразователя с объектом контроля. На характеристики системы в целом большое влияние оказывает конфигурация преобразователя, который является одним из важнейших компонентов прибора любой ультразвуковой системы. Тип преобразователя должен точно соответствовать условиям выполнения контроля. Обычно используют фокусирующие преобразователи, преобразователи со сменными протекторами рабочей поверхности или любые другие, которые соответствуют свойствам материала объекта контроля, имеют нужную частоту и размеры активного элемента¹.

Задача преобразователя как устройства — трансформировать одну физическую величину или энергию в другую физическую величину или энергию (например, тепловую энергию — в электрическую, силу — в перемещение, давление — в электрическое напряжение или ток, электрическое напряжение одного уровня — в электрическое напряжение другого уровня и т. д.). В системах ультразвукового контроля в качестве электроакустических преобразователей обычно используют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), которые излучают сигналы благодаря обратному пьезоэффекту, а принимают благодаря прямому пьезоэффекту.

Основа такого преобразователя — пьезопластина с нанесенными на нее электродами. Используя традиционные методы, невозможно спроектировать преобразователи с широким диапазоном рабочих характеристик, не меняя параметры самой пластины, ее размер, форму и материал. Новые технологии позволяют получать из однотипных пластин преобразователи с самыми различными характеристиками для многих областей применения [1].

Состояние вопроса. Ультразвуковая дефектоскопия на железнодорожном транспорте применяется

для неразрушающего контроля различных объектов, деталей и составных частей вагонов и локомотивов. Особое внимание уделяется ультразвуковому контролю элементов колесных пар (оси, цельнокатанные колеса, бандажи), а также сварных швов, выполненных в процессе ремонта вагонов (вставки и накладки, крепление фасонной лапы к котлу цистерны и др.)².

Появление различных методик ультразвукового контроля колесных пар вагонов обуславливает особый интерес к применению ПЭП с разными углами ввода ультразвука для контроля шейки, предподступичной и подступичной части оси в условиях проведения среднего и текущего ремонта [2, 3]. Сегодня на Белорусской железной дороге основными средствами проведения ультразвукового контроля является дефектоскоп УД2-102 «Пеленг» или аналогичные дефектоскопы, например УД2-102ВД, выпускаемые фирмой ООО «Алтек». На практике и в различных источниках информации бытует мнение, что ПЭП и дефектоскоп должны быть от одного и того же производителя, так как согласование ПЭП с электронным блоком дефектоскопа непосредственно сказывается на чувствительности контроля и выявляемости дефектов. При этом нужно знать комплексное электрическое сопротивление ПЭП для его согласования с генератором и усилителем дефектоскопа³, поэтому встретить ПЭП других производителей в подразделениях вагонного и локомотивного хозяйств, занимающихся неразрушающим контролем, скорее всего, будет невозможно.

В то же время, например, в рекламных материалах⁴ и даже в эксплуатационной документации⁵ указывается, что данный ПЭП может быть использован с любым типом дефектоскопа по существующим для конкретного объекта методикам. В работе [4] рассматривалась зависимость амплитуды донного эхо-сигнала от шероховатости контактной поверхности с использованием ПЭП различных производителей с разным материалом протектора в комплексе с дефектоскопами УД2-12, УД2-102, А1212. При этом значимого отличия результатов измерений разными дефектоскопами не было выявлено.

¹ Ультразвуковые преобразователи [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sk-ndt.ru/files/pep.pdf> (дата обращения: 04.09.2023).

² Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте (ред. от 08.12.2022) [Электронный ресурс]: утв. на 59-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества 19–20.11.2013 г. Доступ из автоматизированной системы поиска информации по железнодорожному транспорту (АСПИЖТ); Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте вагонов (ред. от 15–16.10.2019) [Электронный ресурс]: утв. на 59-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества 19–20.11.2013 г. Доступ из АСПИЖТ.

³ Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х., Бадалян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: краткий справочник. М.: НПЦ НК ЭХО+, 2004. 109 с.

⁴ Преобразователи для ультразвуковой дефектоскопии [Электронный ресурс]. URL: <https://novotest-rf.ru/defektoskopy-ultrazvukovye/preobrazovateli-dlya-ultrazvukovoj-defektoskopii> (дата обращения: 04.09.2023); Преобразователи для дефектоскопии [Электронный ресурс] // Каталог УЗ-константа. URL: <https://constanta.nt-rt.ru/images/showcase/catalog5.pdf> (дата обращения: 04.09.2023).

⁵ Прямые совмещенные ультразвуковые преобразователи П111 (ПЭП) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.inakon.ru/ultrazvukovye-preobrazovateli-pep/dlya-defektoskopov/pryamye-ultrazvukovye-preobrazovateli-p111> (дата обращения: 04.09.2023).

Целью данных исследований было проведение сравнительного анализа чувствительности ультразвукового контроля с применением прямых и наклонных ПЭП различных производителей и сопоставление полученных результатов с чувствительностью контроля при использовании ПЭП от ООО «Алтек», которые традиционно применяются на железной дороге.

Методика эксперимента, материалы и оборудование. В железнодорожной отрасли для оценки чувствительности ультразвукового контроля долгое время применялся метод *эквивалентной чувствительности*, в котором используется образец, характеризующийся минимальными размерами искусственного отражателя определенной формы и ориентации, обнаруживаемый на заданной глубине в изделии при заданной настройке дефектоскопа. Например, чувствительность задана размерами отражателя в виде «пропила», «засверловки», «отверстия» и т. д. [5, 6]

Широкое распространение получил метод настройки *условной чувствительности* на мере СО-2, который заключается в отстройке нулевого уровня на боковом цилиндрическом отражателе и добавлении к нему дополнительного коэффициента усиления K_y , установленного нормативно-техническими документами (НТД)⁶.

Долгое время при настройке параметров контроля сварных соединений малых толщин наибольшее распространение имели угловые отражатели (зарубки), имитирующие поверхностные реальные дефекты. Однако практика показала, что обеспечить вертикальность грани зарубки и гарантировать ее размеры очень трудно. Имеется ряд других ограничений: трансформация упругих волн на гранях и ребрах зарубки может приводить к искажению акустических полей, а нарушение структуры металла поверхности изделия при изготовлении зарубки — к искажениям амплитуды отраженных сигналов. В этой связи в настоящее время на практике очень удобным и наиболее простым для настройки параметров ультразвукового контроля стало использование в качестве отражателя цилиндрического отверстия [7–11].

Переход от *эквивалентной чувствительности* к *условной* на железнодорожном транспорте связан в первую очередь с тем, что все отражатели в соответствии с конструкторской документацией выполнялись на предприятиях самостоятельно. Их изготовление, как правило, проводилось вручную (ножовкой по металлу, электрической дрелью) из-за габаритных размеров объектов контроля, например, для настроечного

(контрольного) образца в виде сформированной колесной пары. Поэтому чувствительность контроля напрямую зависела от качества исполнения отражателей. Сегодня эти отражатели считаются альтернативными, по выявлению которых судят о правильности настройки *браковочной* чувствительности и глубинмера дефектоскопа по мере или отраслевому стандартному образцу (ОСО).

Достоинством применения метода условной чувствительности является то, что для настройки достаточно всего одной меры СО-2 с фиксированными поверяемыми метрологическими характеристиками при контроле различных деталей подвижного состава [8].

Учитывая тот факт, что номенклатура прямых и наклонных ПЭП, а также настроечных образцов, мер с искусственными дефектами из различных сталей, применяемых на железнодорожном транспорте, достаточно широка, авторы данной статьи попытались сузить объем исследований и ограничились проведением эксперимента на образцах, позволяющих, на их взгляд, достаточно хорошо решить поставленную задачу.

Поэтому для проведения исследований был изготовлен образец из стали 20ГЛ, широко применяемой в качестве материала различных деталей и составных частей вагонов, например деталей автосцепного устройства (корпус автосцепки, корпус поглощающего аппарата, тяговый хомут), вагонной рамы (пятник, надпятниковая коробка), тележки вагона (балка наддрессорная, рама боковая) и других. Данный вид стали относится к легированной углеродистой феррито-перлитной стали средней прочности с хорошей хладостойкостью и вязкостью разрушения. Образец представляет собой квадратную пластину размером 156×156 мм и толщиной 20 мм. В целях наглядного сравнения падения чувствительности контроля размеры образца определялись исходя из габаритов ПЭП и количества цилиндрических искусственных боковых отражателей на различной глубине в семи секторах.

При настройке условной чувствительности контроля для осей колесных пар на основании действующих НТД⁷ используется сквозной цилиндрический искусственный боковой отражатель (далее — ЦБО) диаметром 6 мм (меры СО-3Р, СО-2 для метода АР [АР1.1, АР1.3, АР3.1, АР3.2, АР3.3] и ОСО 32-006-2002 для метода ВР [ВР1–ВР4]). В настоящей работе в качестве эталонных отражателей приняты ЦБО диаметром 3 мм на различной глубине. Шероховатость поверхности ввода ультразвука (VЗ) $R_z \leq 2,9$ мкм.

⁶ Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте (ред. от 08.12.2022) [Электронный ресурс]. Доступ из АСПИЖТ; Правила неразрушающего контроля сварных соединений при ремонте вагонов (ред. от 15–16.10.2019) [Электронный ресурс]. Доступ из АСПИЖТ.

⁷ Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте (ред. от 08.12.2022). Доступ из АСПИЖТ.

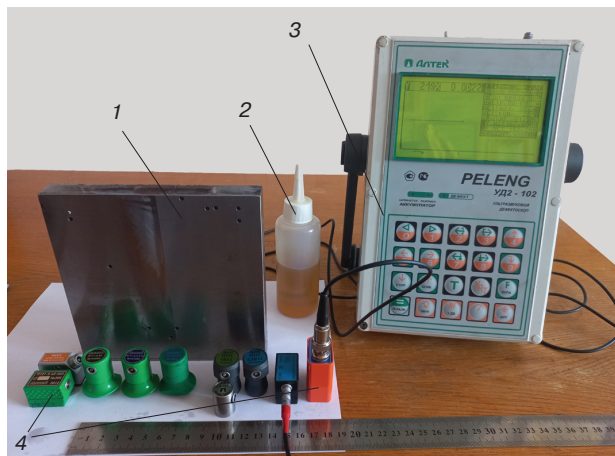


Рис. 1. Технические средства, используемые в исследовании:
1 — образец; 2 — индустриальное масло И-20;
3 — дефектоскоп УД2-102 «Пеленг»; 4 — пьезоэлектрические преобразователи

Fig. 1. Technical tools used in the research:
1 — sample; 2 — Industrial Oil I-20;
3 — Flaw Detector UD2-102 Peleng; 4 — piezoelectric transducers

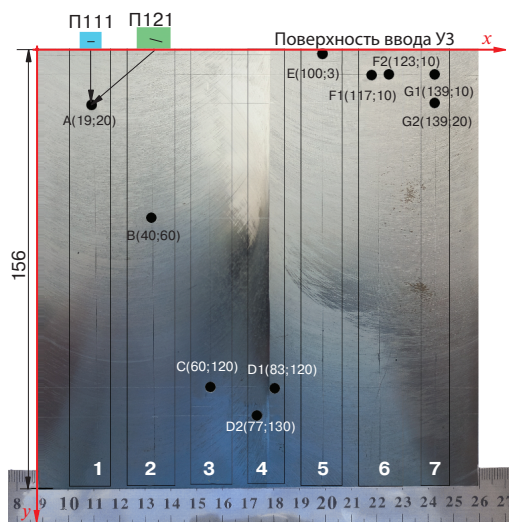


Рис. 2. Схема прозвучивания ЦБО прямыми и наклонными ПЭП:

1–7 — сектора, в которых находится боковое цилиндрическое отверстие (БЦО); П111 — прямой преобразователь (угол ввода 0°, частота 2,5–5 МГц); П121 — наклонный преобразователь (угол ввода 65, 43, 40°, частота 2,5–5 МГц)

Fig. 2. Diagram of probing a cylindrical lateral reflector with straight and angle piezoelectric transducers:
1–7 — sectors with the lateral cylindrical hole; П111 — straight transducer (insertion angle 0°, frequency 2.5–5 MHz); П121 — angle transducer (insertion angle 65, 43, 40°, frequency 2.5–5 MHz)

На рис. 1 представлен образец с вышеописанными отражателями в семи секторах. В качестве дефектоскопа использовался УД2-102 «Пеленг» (ООО «Алтек»), в качестве контактной жидкости применялось индустриальное масло И-20. Сравнивались ПЭП: прямые

ООО «Алтек» и НПО «ИНАКОН» (РФ), наклонные ООО «Алтек» (РФ), ООО «Искатель-2» (РФ) и СИУИ (КНР). На рис. 2 представлена схема прозвучивания ЦБО прямыми и наклонными ПЭП на примере отражателя в секторе 1 с координатами центра отверстия А(19; 20).

Эксперимент заключался в сравнении амплитуды сигнала от ЦБО в изготовленном образце ПЭП с одинаковыми характеристиками различных производителей при использовании дефектоскопа УД2-102 «Пеленг». Фиксация амплитуды сигнала от ЦБО проводилась на общепринятом браковочном уровне, что составляет 50 % экрана дефектоскопа. В работе учитывались ЦБО не во всех секторах по причине нахождения некоторых из них на одинаковой глубине (например, для прямых ПЭП не учитывались сектора 4 и 6, которые имеют ЦБО на такой же глубине, как и в секторах 3 и 7 соответственно). Ввиду отсутствия наклонных ПЭП различных производителей с большим углом ввода для целей уменьшения мертвой зоны (ЦБО находится в приповерхностной зоне) отражатель в секторе 5 также не учитывался. В секторе 7 для прямого ПЭП учитывался ЦБО, ближайший к поверхности ввода УЗ, по причине невозможности выявления симметрично расположенного отражателя на большей глубине.

Настройка глубиномера осуществлялась по тем же известным ЦБО, поскольку задача оценки точности показаний глубины их залегания не ставилась. Результаты эксперимента приведены в табл. 1, 2.

Эксперимент проводился для каждого ПЭП несколько раз и статистически значимого изменения результатов измерений установлено не было.

Результаты исследований. Эксперимент показал, что чувствительность преобразователей П111-2,5-К12 НПО «ИНАКОН» сопоставима с преобразователями П111-2,5-К12, П111-2,5-К12П ООО «Алтек». При этом из табл. 1 и рис. 3 видно, что чувствительность П111-5,0-12 с протектором из стеклотекстолита ООО «Алтек» уступает П111-5,0-К12 с протектором из керамики НПО «ИНАКОН» (общее усиление дефектоскопа с использованием ПЭП производства НПО «ИНАКОН» при выявлении ЦБО в секторах 1, 2, 3, 7 образца на 10–16 дБ меньше в сравнении с ПЭП ООО «Алтек»).

При сравнении П111-5,0-К12 НПО «ИНАКОН» с П111-5,0-К6 ООО «Алтек» чувствительность на небольшой глубине сопоставима, а с увеличением глубины падает, так как это связано с диаметром пьезопластины (12 мм у П111-5,0-К12, 6 мм у П111-5,0-К6). Поскольку угол раскрытия диаграммы направленности у преобразователя П111-5,0-К12 с диаметром пьезопластины 12 мм меньше, то направленность поля ПЭП выше.

При сравнении чувствительности наклонных ПЭП (табл. 2, рис. 4) было установлено снижение чувствительности П121-5-65-003, П121-2,5-40-091 ООО «Алтек»

Таблица 1

Сравнение чувствительности контроля с использованием прямых ПЭП (П111)

Table 1

Comparison of control sensitivity using straight piezoelectric transducers (P111)

Сектор ЦБО, обозначение и координаты центра отверстия, мм	Тип ПЭП					
	П111-2,5-К12	П111-2,5-К12П*	П111-2,5-К12	П111-5,0-12	П111-5,0-К6	П111-5,0-К12
	Изготовитель					
	«Алтек»	«Алтек»	НПО «ИНАКОН»	«Алтек»	«Алтек»	НПО «ИНАКОН»
Усиление дефектоскопа, дБ						
1, A (19;20)	6	6	7	35	16	19
2, B (40;60)	15	12	14	33	26	23
3, C (60;120)	22	21	23	44	38	29
4, D1 (83;120), D2 (77;130)	—	—	—	—	—	—
5, E (100;3)	—	—	—	—	—	—
6, F1 (117;10), F2 (123;10)	—	—	—	—	—	—
7, G1 (139;10), G2 (139;20)	—	—	—	32 (G1)	11 (G1)	17 (G1)
Донный сигнал	6	5	6	23	14	15

* Со встроенной микросхемой энергонезависимой памяти.

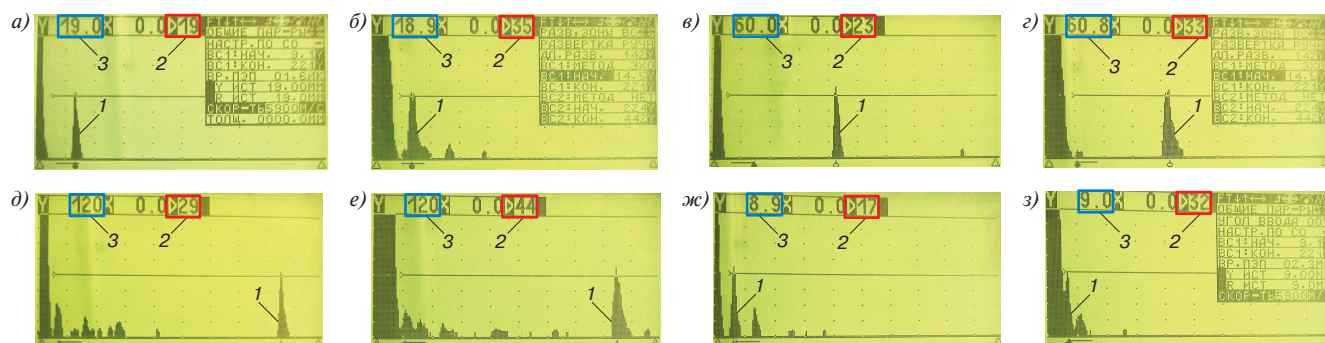


Рис. 3. Дефектограммы контроля ЦБО в образце для прямых ПЭП:

1 — эхо-сигнал от БЦО; 2 — значение общего усиления дефектоскопа УД2-102 «Пеленг», дБ; 3 — значение глубины залегания БЦО, мм; а, в, д, ж — П111-5,0-К12 НПО «ИНАКОН» (материал протектора — керамика); б, г, з — П111-5,0-12 ООО «Алтек» (материал протектора — стеклотекстолит); а, б — сектор 1, А (19;20); в, г — сектор 2, В (40;60); д, е — сектор 3, С (60;120); ж, з — сектор 7, Г (139;10)

Fig. 3. Cylindrical lateral reflector control diagrams in a sample for straight piezoelectric transducers:

1 — echo signal from the lateral cylindrical hole; 2 — total gain of Flaw Detector UD2-102 Peleng, dB; 3 — depth of the lateral cylindrical hole, mm; а, в, д, ж — P111-5,0-K12 NPO INAKON (protector material: ceramic); б, г, з — P111-5,0-12 Altek LLC (protector material: fiberglass laminate); а, б — Sector 1, A (19;20); в, г — Sector 2, B (40;60); д, е — Sector 3, C (60;120); ж, з — Sector 7, G (139;10)

по сравнению с преобразователями AFN5-1010-65L, П121-2,5-43СТ81 фирмы SIUI и ООО «Искатель-2» соответственно (общее усиление дефектоскопа с использованием ПЭП AFN5-1010-65L производства SIUI при выявлении ЦБО в секторах 1, 2 образца на 14–18 дБ меньше в сравнении с ПЭП П121-5-65-003 ООО «Алтек», а для ПЭП П121-2,5-43СТ81 производства ООО «Искатель-2» при выявлении ЦБО в секторах 1, 5 образца общее усиление дефектоскопа на 8–11 дБ меньше в сравнении с ПЭП П121-2,5-40-091 ООО «Алтек»).

Например, на рис. 4 (и, к) хорошо видно, как ЦБО во втором секторе образца на глубине 60 мм выявляется при существенной разнице в общем усилении дефектоскопа. При использовании преобразователя AFN5-1010-65L амплитуда сигнала достигает браковочного уровня (50 % экрана) при 55 дБ, в то время как для П121-5-65-003 при 73 дБ.

При этом выделить полезный сигнал в массиве «ложных» при использовании П121-5-65-003 достаточно сложно. На рис. 4 (а, б) ЦБО в секторе 5 на глубине 3 мм выявляется при 32 дБ (амплитуда достигает 50 %

Таблица 2

Сравнение чувствительности контроля с использованием наклонных ПЭП (П121)

Table 2

Comparison of control sensitivity using angle piezoelectric transducers (P121)

Сектор ЦБО, обозначение и координаты центра отверстия, мм	Тип ПЭП			
	П121-5-65-003	AFN5-1010-65L	П121-2,5-40-091	П121-2,5-43СТ81
	Изготовитель			
	«Алтек»	SIUI	«Алтек»	«Искатель-2»
	Усиление дефектоскопа, дБ			
1, A (19;20)	41	27	30	22
2, B (40;60)	73	55	50	46
3, C (60;120)	—	—	—	—
4, D1 (83;120), D2 (77;130)	—	—	—	—
5, E (100;3)	27	27	32	21
6, F1 (117;10), F2 (123;10)	—	—	—	—
7, G1 (139;10), G2 (139;20)	—	—	22 (G1), 26 (G2)	19 (G1), 23 (G2)

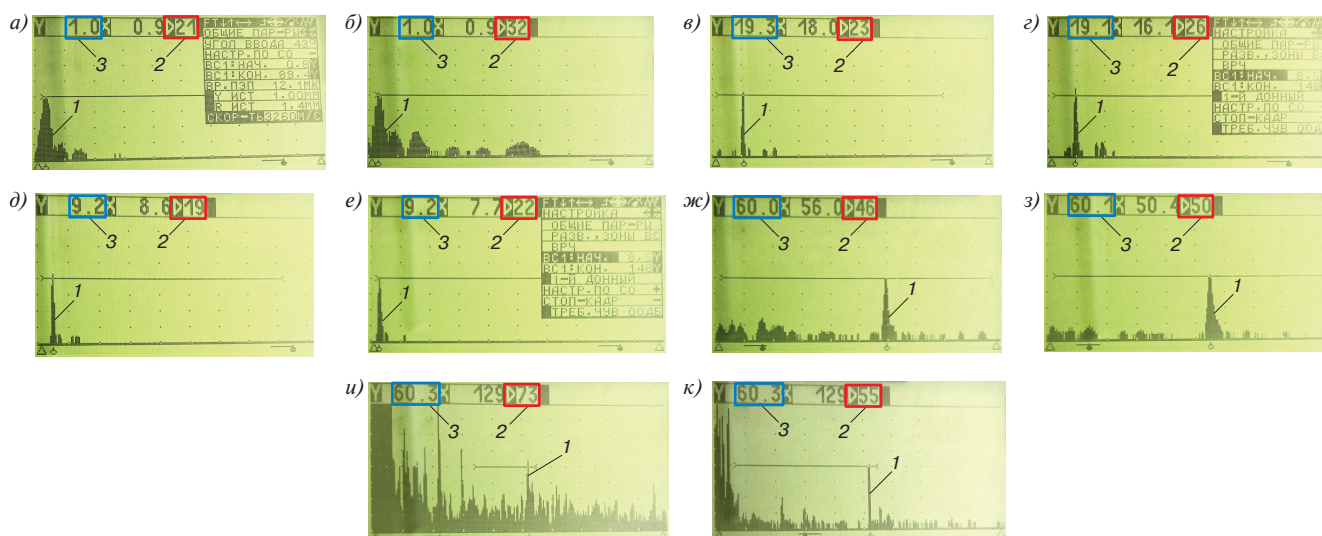


Рис. 4. Дефектограммы контроля ЦБО в образце для наклонных ПЭП:

1 — эхо-сигнал от БЦО; 2 — значение общего усиления дефектоскопа УД2-102 «Пеленг», дБ; 3 — значение глубины залегания БЦО, мм;
а, в, д, ж — П121-2,5-43СТ81 (ООО «Искатель-2»); б, г, е, з — П121-2,5-40-091 (ООО «Алтек»); и — П121-5-65-003 (ООО «Алтек»);
к — AFN5-1010-65L (SIUI); а, б — сектор 5, E (100;3); в, г — сектор 7, G2 (139;20); д, е — сектор 7, G1 (139;10); ж, з, и, к — сектор 2, B (40;60)

Fig. 4. Lateral cylindrical hole control diagram in a sample for angle piezoelectric transducers:

1 — echo signal from the lateral cylindrical hole; 2 — total gain of Flaw Detector UD2-102 Peleng, dB; 3 — depth of the lateral cylindrical hole, mm;
а, в, д, ж — P121-2,5-43ST81 (Iskatel-2 LLC); б, г, е, з — P121-2,5-40-091 (Altek LLC); и — P121-5-65-003 (Altek LLC); к — AFN5-1010-65L (SIUI); а, б — Sector 5, E (100;3); в, г — Sector 7, G2 (139;20); д, е — Sector 7, G1 (139;10); ж, з, и, к — Sector 2, B (40;60)

экрана) для П121-2,5-40-091, в то время как П121-2,5-43СТ81 при 21 дБ. С точки зрения физических свойств УЗ у ПЭП с углом ввода 43° мертвая зона будет меньше, чем у ПЭП с углом ввода 40°, т. е. чувствительность выявления ЦБО в приповерхностном слое образца будет выше у П121-2,5-43СТ81. Однако разница амплитуд в 11 дБ при разнице углов ввода в 3° считается большой.

Обсуждение и заключение. Как показывает практика, при оценке качества объектов железнодорожного транспорта при ультразвуковом контроле важную роль играет выбор такого ПЭП, который при меньшем общем усилении дефектоскопа обнаруживает дефекты. Это связано с тем, что с ростом общего усиления дефектоскопа растут шумы и появляются ложные эхо-сигналы, которые могут привести к перебраковке.

Проведенные исследования показали, что чувствительность ультразвукового контроля с использованием ПЭП таких производителей, как НПО «ИНАКОН», ООО «Искатель-2», фирма SIUI не уступает, а в отдельных случаях превосходит чувствительность контроля при применении традиционных ПЭП от ООО «Алтек», используемых на железной дороге. Полученные результаты свидетельствуют, что преобразователи производства компании SIUI (AFN5-1010-65L), ООО «Искатель-2» (П121-2,5-43СТ81), НПО «ИНАКОН» (П111-5,0-К12) могут быть использованы вместо ПЭП ООО «Алтек», которые выпускаются непосредственно для дефектоскопов типа УД2-102 «Пеленг».

Сегодня на рынке имеется большой ассортимент преобразователей, обладающих необходимыми характеристиками: повышенной точностью, стабильностью, чувствительностью, расширенным рабочим диапазоном частот и т. д. Разработаны технологии проектирования (синтеза) ПЭП с использованием пространственных энергосиловой структуры и электромеханической обратной связи, пространственного расположения и коммутации электродов пьезоэлемента, технологии включения пьезорезонаторов и трансформаторов в схемы электрических фильтров и технологии присоединения к пьезоэлементу добавочных элементов и т. д.

На основании полученных результатов можно полагать, что ограничиваться только ПЭП, предлагаемыми заводом-изготовителем дефектоскопа, для обеспечения согласования электронного блока с преобразователями не обязательно. Однако это возможно только в том случае, если производитель ПЭП при отдельной его поставке заказчику (не в комплекте с дефектоскопом) указывает в паспорте ПЭП информацию о возможности его использования с конкретными типами ультразвуковых дефектоскопов.

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

Finding: 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. Шарапов В. М., Сотула Ж. В. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования // Электроника: наука, технологии, бизнес. 2012. № 5 (00119). С. 96–102 [Sharapov V. M., Sotula Zh. V. Piezoceramic converters. New design technologies. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2012;(5):96–102. (In Russ.)].

2. Отока А. Г., Холодильов О. В. Ультразвуковой контроль подступичной части оси колесной пары с использованием преобразователей на фазированной решетке // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. 2022. № 2 (45). С. 73–78 [Otoka A. G., Kholodilov O. V. Ultrasonic testing of the bearing part of the axis of the wheels pair using phased array transducers. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2022;(2):73–78. (In Russ.)].

3. Ахмеджанов Р. А., Макарошкин В. В., Родченко Л. А. О совершенствовании ультразвукового контроля оси колесной пары вагона // Известия Транссиба. 2014. № 2 (18). С. 7–18 [Akhmedzhanov R. A., Makarochkin V. V., Rodchenko L. A. Improvement of ultrasonic inspection of the wagon wheelset axle. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2014;(2):7–18. (In Russ.)].

4. Дымкин Г. Я., Лохов В. П. Еще раз о влиянии шероховатости поверхности изделия на результаты ультразвукового контроля прямым ПЭП // В мире НК. 2007. № 1 (35). С. 25–26 [Dymkin G. Ya., Lokhov V. P. Influence of Products' Surface Roughness on Results of Ultrasonic Inspection with the Use of Piezoelectric Transducers. *NDT World Review*. 2007;(1):25–26. (In Russ.)].

5. Синица А. Н., Куликов В. П., Синица М. А. Ультразвуковой контроль осей трамвайных вагонов дефектоскопом УД2-102 «Пеленг» // Вестник Белорусско-Российского университета. 2023. № 3 (80). С. 153–160 [Sinita A. N., Kulikov V. P., Sinita M. A. Ultrasonic inspection of tramway car axles with UD2-102 Peleng flaw detector. *Belarusian-Russian University Bulletin*. 2023;(3):153–160. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24412/2077-8481-2023-3-153-160>.

6. Киреев А. Н. Настройка эквивалентной чувствительности при ультразвуковом контроле стыков сварных соединений из машиностроительных сталей // В мире НК. 2016. Т. 19, № 3. С. 74–76 [Kireev A. N. Equivalent sensitivity setting during ultrasonic inspection of steel butt welded joints. *NDT World Review*. 2016;19(3):74–76. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.12737/21175>.

7. Киреев А. Н., Витренко В. А. Применение функции временной регулировки чувствительности при настройке условной чувствительности ультразвукового контроля деталей подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 6. С. 377–382 [Kireev A. N., Vitrenko V. A. Application of DAC function at the setting of conditional sensitivity of ultrasonic control of rolling stock parts with echo-pulse method. *Russian Railway Science Journal*. 2017;76(6):377–382. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-377-382>.

8. Могильнер Л. Ю. Применение цилиндрического отражателя для настройки чувствительности при ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2018. № 7. С. 27–36 [Mogilner L. Yu. Application of a cylindrical reflector for sensitivity adjustment in ultrasonic control. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018;(7):27–36. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.1134/S0130308218070047>.

9. Киреев А. Н., Киреева М. А. Анализ погрешностей условной чувствительности при ультразвуковом контроле деталей подвижного состава // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (38). С. 27–34 [Kireev A. N., Kireeva M. A. Analysis of the errors of conditional sensitivity use at ultrasonic control of railroads rolling stock details. *Herald of the USURT*. 2018;(2):27–34. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2018-2-27-34>.

10. Отока А. Г., Холодильов О. В. Влияние температуры контактной среды на иммерсионный ультразвуковой контроль колесных пар вагонов при ремонте // Известия Транссиба. 2023. № 3 (55). С. 24–33 [Otoka A. G., Kholodilov O. V. Influence of the temperature of the contact medium for immersion ultrasonic testing wheelsets of wagons during repair. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023;(3):24–33. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/xdkmwv>.

11. Отока А. Г., Логунов В. Г., Холодильов О. В. Чувствительность контактного и иммерсионного способов ультразвукового контроля при выявлении эталонных отражателей в настроечном образце // Неразрушающий контроль и диагностика. 2023. № 1. С. 30–36

[Otoka A. G., Logunov V. G., Kholodilov O. V. Sensitivity of contact and immersion ultrasonic control methods in detecting reference reflectors in a tuning sample. *Nondestructive testing and diagnostics*. 2023;(1):30-36. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/gvytjpj>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Генрикович ОТОКА,

магистр технических наук, аспирант, кафедра «Вагоны», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34); инженер-технолог, Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги» (246014, г. Гомель, ул. Телегина, 1а), SPIN-код: 2466-5708, Author ID: 1220168, <https://orcid.org/0009-0003-9926-9439>

Олег Викторович ХОЛОДИЛОВ,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Вагоны», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), SPIN-код: 1818-4103, Author ID: 188646, <https://orcid.org/0009-0005-5799-0097>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander G. OTOKA,

Master Sci. (Eng.), Postgraduate, Carriage Department, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, 34, Kirova St.); Process Engineer, Gomel Carriage Depot, Belarusian Railway Gomel Department (Republican Unitary Enterprise) (246014, Gomel, 1a, Telegina St.), SPIN-code: 2466-5708, Author ID: 1220168, <https://orcid.org/0009-0003-9926-9439>

Oleg V. KHOLODILOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Carriage Department, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, 34, Kirova St.),

SPIN-code: 1818-4103, Author ID: 188646, <https://orcid.org/0009-0005-5799-0097>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Генрикович ОТОКА. Осуществление эксперимента, сбор и структурирование материалов, написание и редактирование текста статьи, выводы (60%).

Олег Викторович ХОЛОДИЛОВ. Формирование направления исследования, формулировка целей и задач, редактирование текста статьи, выводы (40%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander G. OTOKA. Implementation of the experiment, collection and structuring of materials, article writing and editing, conclusions (60%).

Oleg V. KHOLODILOV. Formation of the research direction, formulation of goals and objectives, article editing, conclusions (40%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.01.2024, рецензия от первого рецензента получена 29.01.2024, рецензия от второго рецензента получена 05.02.2024, принята к публикации 12.02.2024.

The article was submitted 12.01.2024, first review received 29.01.2024, second review received 05.02.2024, accepted for publication 12.02.2024.



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.

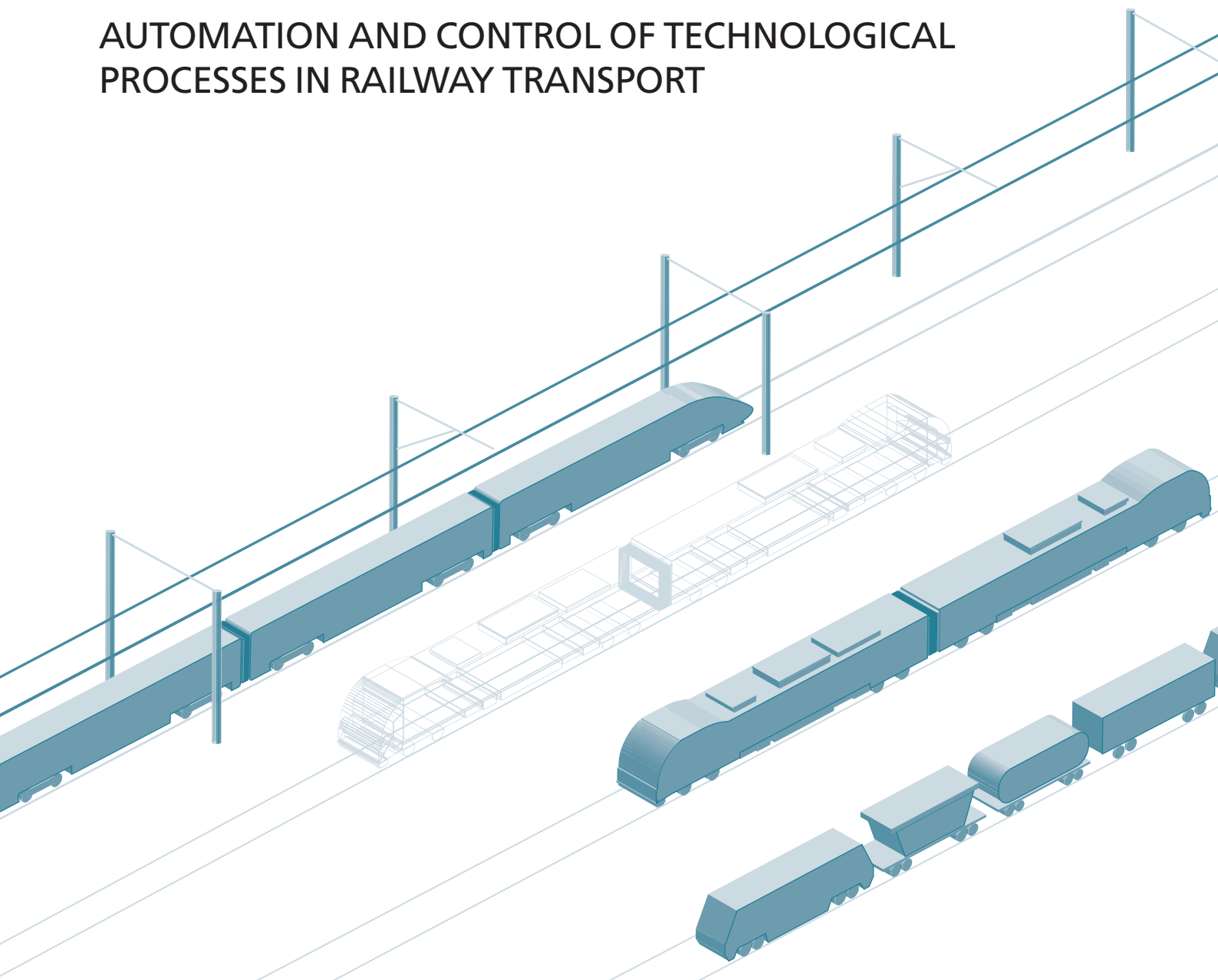
Издание адресовано в первую очередь инженерам-энергетикам, инженерам по водоснабжению, занимающимся вопросами в области нормирования потребления топливно-энергетических и водных ресурсов, а также вопросами эффективного их использования на нетяговые нужды железнодорожного транспорта. Может быть использовано 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

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 656.212.5

EDN: <https://elibrary.ru/wurylq>**Актуализация параметров «расчетных бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок****С. А. Бессоненко**✉, **А. А. Гунбин**, **А. А. Климов**Сибирский государственный университет путей сообщения,
Новосибирск, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Проектирование продольного профиля сортировочных горок предусматривает выполнение конструктивных и технологических расчетов, при которых производится моделирование скатывания отцепов из одиночных вагонов с установленными характеристиками — «расчетных бегунов». За время, прошедшее с разработки применяемых сегодня норм проектирования сортировочных горок, был значительно обновлен парк вагонов, возросла доля вагонов с нагрузкой на ось 25 т, разработаны модели инновационных вагонов с нагрузкой на ось 27 т. Объектом исследования в данной работе являются числовые характеристики основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки. Цель исследования — актуализация параметров «расчетных бегунов» для современного парка вагонов, обращающегося на сети железных дорог РФ.

Материалы и методы. Авторами выполнены натурные наблюдения за скатыванием одиночных вагонов на реальной сортировочной горке. Наблюдения проводились на прямом в плане участке пути, без торможения в пределах зоны измерения, в летний период года. Анализ статистических данных по скатыванию одиночных вагонов на той же сортировочной горке в летний период произведен с помощью комплекса компьютерного зрения, разработанного специалистами Ростовского филиала АО «НИИАС».

Результаты. Получены новые значения основного удельного сопротивления движению для установленных типов «расчетных бегунов». Показатели сопротивления значительно снижены по сравнению с существующими нормативами. Использование новых характеристик «расчетных бегунов» позволит повысить качество горочных расчетов при разработке проектных решений по высоте, продольному профилю и техническому оснащению сортировочных горок.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования показали необходимость корректировки правил и норм проектирования сортировочных устройств в части определения значений основного удельного сопротивления движению для установленных типов «расчетных бегунов». Для внесения в нормативные документы новых значений основного удельного сопротивления движению целесообразно продолжить данные исследования с целью расширения объема выборки и уточнения полученных результатов. При этом аналогичные исследования следует выполнить на разных станциях сети, расположенных в различных климатических зонах, как в летний, так и в зимний периоды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сортировочная горка, основное удельное сопротивление движению вагона, «расчетные бегуны», горочные расчеты, комплекс компьютерного зрения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Актуализация параметров «расчетных бегунов», используемых при проектировании сортировочных горок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 60–68.

Original article

UDK 656.212.5

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

Updating the parameters of “calculated runners” used in the design of gravity humps

Sergey A. Bessonenko✉, Anton A. Gunbin, Alexander A. Klimov

Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The design of the longitudinal side of the gravity humps provides for the implementation of structural and technological calculations, which simulate the rolling of the cut of single cars with established characteristics — “calculated runners”. The fleet of cars has been significantly updated, the share of cars with an axle load of 25 t has increased, and the innovative cars models with an axle load of 27 t has been constructed since the development of the gravity humps design standards. The object of research in this work is the numerical characteristics of the main specific resistance to movement of cars when rolling down a gravity hump. The subject of the study are the values of the main specific resistance to movement of “calculated runners” for modern car fleet circulation on the Russian railway network. The purpose of the study is to update the parameters of the main specific resistance to movement of “calculated runners” used in the design of a gravity hump.

Materials and methods. The researchers made in-field observations of single cars rolling down a real gravity hump. The observations were made on a straight track section without braking within the measurement area in summer. The statistical analysis of single cars rolling on the same gravity hump in summer involved a computer vision system developed by the Rostov Branch of the Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation.

Results. The authors obtained new values of the main specific resistance to movement for the established types of “calculated runners”, which have significantly decreased compared to existing standards. The use of new characteristics of “calculated runners” would improve the quality of gravity humps calculations in the development of design solutions for height, longitudinal side and technical equipment of gravity humps.

Discussion and conclusion. The obtained results showed the need to adjust the rules and design standards of shunting facilities in terms of determining the values of the main specific resistance to movement for the established types of “calculated runners”. In order to introduce new values of the main specific resistance to movement into regulatory documents, it is advisable to continue research in order to expand the sample size and clarify the obtained results. At the same time, similar studies should be performed at different marshalling yards of the network located in different climatic zones.

KEYWORDS: gravity hump, the main specific resistance to the movement of the car, “calculated runners”, gravity humps calculations, the Computer vision system

FOR CITATION: Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Updating the parameters of “calculated runners” used in the design of gravity humps. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):60-68. (In Russ.).

Введение. На стадии проектирования сортировочных горок выполняются конструктивные и технологические расчеты, по результатам которых определяются высота и итоговая конструкция продольного профиля спускной части. При этом используются «расчетные бегуны» — одиночные четырехосные полувагоны с определенными характеристиками. Согласно существующей методике расчета в зависимости от мощности горки и вида решаемой задачи могут использоваться пять различных типов расчетных бегунов: «очень плохой» (ОП), «плохой» (П), «хороший» (Х) и «очень хороший» (ОХ-85 и ОХ-100).

«Расчетные бегуны» в сочетании с соответствующими условиями скатывания (благоприятными или неблагоприятными метеорологическими условиями и соответственно «легким» и «трудным» маршрутами скатывания отцепов в горочной горловине) используются при решении задач по проверке высоты сортировочной горки, расчету мощности тормозных позиций, при анализе режима интервально-прицельного торможения и др.

Для каждого типа «расчетного бегуна» установлены следующие числовые характеристики: масса (т) и основное удельное сопротивление движению (H/kH), от которых во многом зависят результаты скатывания отцепов и, как следствие, итоговые значения высоты и параметров продольного профиля сортировочной горки. Используемые в настоящее время числовые характеристики «расчетных бегунов» приведены в Правилах и нормах проектирования сортировочных устройств 2003 г.¹ (указанные Правила утратили силу, но по факту используются проектными организациями; в настоящее время готовятся к принятию актуализированные сборники правил).

Необходимо отметить, что числовые характеристики «расчетных бегунов» и функций распределения основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки не обновлялись на протяжении весьма длительного периода. Изложенные в нормативах данные были получены по результатам исследований Центрального научно-исследовательского института Министерства путей сообщения СССР [1], выполненных в 70-х гг. прошлого столетия. Очевидно, что за прошедшее время значительно обновился парк вагонов, произошло улучшение ходовых характеристик подвижного состава и, как следствие, должны измениться числовые характеристики как функций распределения основного удельного сопротивления движению, так и «расчетных бегунов».

На сети железных дорог значительно увеличился парк инновационных вагонов с нагрузкой на ось 25 т, что соответствует значению массы «очень хорошего бегуна» ОХ-100. Планируется дальнейшее увеличение нагрузки на ось вагонов — в частности, разработаны модели инновационных вагонов с нагрузкой на ось 27 т. В настоящее время при разработке проектов развития железнодорожной инфраструктуры общего пользования на среднесрочную перспективу обращение указанных инновационных вагонов (27 т/ось) предусматривается только в маршрутных отправлениях на определенных направлениях. Следовательно, появление таких вагонов в структуре перерабатываемого вагонопотока на сортировочных горках в ближайшее время не ожидается. Однако со временем вагоны с нагрузкой на ось 27 т также будут поступать в переработку на сортировочные горки, что приведет к необходимости выделения нового типа «расчетного бегуна» — ОХ-108.

В целом, для принятия более обоснованных проектных решений при строительстве новых или реконструкции существующих сортировочных горок необходимо продолжить работы, направленные на уточнение значений основного удельного сопротивления движению вагонов [2, 3], и пересмотреть числовые характеристики «расчетных бегунов». Таким образом, актуализация параметров «расчетных бегунов» для современного парка вагонов, обращающегося на сети железных дорог РФ, является актуальной задачей в области проектирования сортировочных горок.

Материалы и методы. Исследования значений сил сопротивления движению вагонов, возникающих при скатывании с сортировочных горок, в СССР начались в 30-х гг. прошлого столетия [4]. Основные положения расчетов сил сопротивления, которые в основном применяются и в настоящее время, были сформулированы и изложены в Инструкции по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР². В существующей методике расчета рассматриваются четыре вида сил сопротивления движению, при этом ходовые характеристики вагонов учитываются при определении основного удельного сопротивления движению w_0 .

Для определения актуализированных значений случайной величины w_0 были проведены натурные наблюдения за скатыванием одиночных вагонов на реальной сортировочной горке. Для минимизации влияния других сил сопротивления движению натурные наблюдения проводились на прямом в плане участке пути, без торможения в пределах зоны измерения,

¹ Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм: утв. МПС РФ 10.10.2003. М.: Техинформ, 2003. 168 с. (не подлежат применению в соответствии с Приказом Минтранса России от 19.09.2019 № 299 «О признании не подлежащими применению актов Министерства путей сообщения СССР и Министерства путей сообщения Российской Федерации»).

² Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР: ВСН 56-78. Введ. 1979-01-01 / Минтрансстрой СССР; МПС СССР. М.: Транспорт, 1978. 175 с.

в летний период года [5–9]. Затем были обработаны статистические данные по скатыванию — скорости движения одиночных отцепов вагонов на той же сортировочной горке в летний период, полученные по данным комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей, разработанного специалистами Ростовского филиала АО «НИИАС» [10–12]. Актуальность применения данного метода для совершенствования систем контроля за роспуском отцепов с сортировочной горки подтверждается результатами и других аналогичных исследований [13].

Первоначально на основании изменения диапазона скоростей скатывания вагона на фиксированном участке производился расчет суммарного удельного сопротивления движению $w_{\text{сум}}$. Далее с учетом данных метеостанции о температуре воздуха, скорости и направлении ветра в момент роспуска из значения суммарного сопротивления выделялось основное удельное сопротивление движению вагона по формуле, Н/кН

$$w_o = w_{\text{сум}} - w_{\text{св}}, \quad (1)$$

где $w_{\text{св}}$ — сила удельного сопротивления движению вагона от среды и ветра.

В результате для каждой весовой категории вагонов, установленной правилами и нормами проектирования сортировочных устройств (тяжелой, средне-тяжелой, средней, легко-средней и легкой), получены плотности и функции распределения случайной величины w_o . Для определения числовых характеристик «расчетных бегунов» использованы интегральные функции распределения величины w_o для следующих весовых категорий вагонов:

- тяжелой — для определения значений «хорошего» (Х) и «очень хорошего» (ОХ-85 и ОХ-100) бегунов;
- легкой — для определения значений «плохого» (П) и «очень плохого» (ОП) бегунов.

При актуализации числовых характеристик «расчетных бегунов» принимались новые значения w_o , соответствующие вероятностям интегральных функций распределения, принятым при определении существующих характеристик «расчетных бегунов». Так, минимальные и максимальные значения основного удельного сопротивления, соответствующие «расчетным бегунам» ОП и ОХ-100, принимались по граничным значениям новых интегральных функций распределения — соответственно для легкой и тяжелой весовых категорий. Промежуточные значения основного удельного сопротивления «расчетных бегунов» П, Х и ОХ-85 принимались по новым интегральным функциям распределения величины

w_o , но в соответствии со значениями вероятностей, определенными по существующим интегральным функциям распределения.

Результаты исследования. Сопоставление существующих и новых числовых характеристик интегральных функций распределения случайной величины w_o для тяжелой и легкой весовых категорий вагонов (табл. 1) выполнено для общего парка перерабатываемого вагонопотока. Так как в качестве «расчетных бегунов» используются полувагоны (согласно требованиям Правил и норм проектирования³), то рассмотрение интегральной функции распределения справедливо только для данного типа вагонов. Для рассматриваемой сортировочной горки доля полувагонов в структуре переработанного за период наблюдения отцепопотока, состоящего из одиночных вагонов, составила 0,45 для легкой и 0,30 для тяжелой весовой категории вагонов.

По обеим весовым категориям (табл. 1) значительно увеличилось число вагонов со значением сопротивления менее 0,5 Н/кН — минимально установленного в существующих нормативах, что подтверждает улучшение ходовых характеристик современного парка вагонов и необходимость пересмотра числовых характеристик «расчетных бегунов». Диапазон изменения величины w_o для полувагонов в рассматриваемой выборке составил 0,1–3,6 Н/кН для легкой и 0,1–2,6 Н/кН для тяжелой весовой категории, что соответствует границам диапазона допустимых значений основного удельного сопротивления движению, приведенным в табл. 1.

Соотношение существующих и новых интегральных функций распределения основного удельного сопротивления движению вагонов приведено на рис. 1 и 2 (соответственно для тяжелой и легкой весовых категорий). Необходимо отметить, что конфигурации кривых интегральных функций для новых данных отличаются от существующих графиков функций, особенно в начальных и конечных областях, которые и используются при определении значений основного удельного сопротивления движению для установленных типов «расчетных бегунов». Также следует отметить значительное смещение новых интегральных функций распределения ближе к оси ординат и существенное сокращение диапазона допустимых значений случайной величины w_o для легкой весовой категории вагонов, что также влияет на итоговые новые числовые характеристики «расчетных бегунов» установленного типа.

При обработке новых данных об основном удельном сопротивлении движению использованы результаты скатывания 5000 одиночных вагонов разнообразных

³ Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. М., 2003.

Таблица 1

Интегральные функции распределения случайной величины w_0
для тяжелой и легкой весовых категорий вагонов

Table 1

Integral distribution functions of the random variable w_0 for heavy- and lightweight cars

Значения w_0 , Н/кН	Тяжелая весовая категория		Легкая весовая категория	
	Существующие значения*	Новые значения	Существующие значения*	Новые значения**
0,1	—	0,052	—	0,055
0,2	—	0,094	—	0,094
0,3	—	0,149	—	0,149
0,4	—	0,230	—	0,239
0,5	0,004	0,336	0,006	0,353
0,6	0,016	0,454	0,014	0,468
0,7	0,044	0,580	0,028	0,562
0,8	0,095	0,687	0,049	0,632
1,0	0,269	0,839	0,117	0,731
1,2	0,499	0,913	0,216	0,796
1,4	0,708	0,952	0,335	0,846
1,6	0,853	0,972	0,461	0,876
1,8	0,934	0,986	0,581	0,900
2,0	0,974	0,990	0,686	0,920
2,3	0,994	0,996	0,808	0,940
2,6	0,999	0,999	0,890	0,955
3,0	—	—	0,952	0,975
3,5	—	—	0,985	0,995
4,0	—	—	0,996	0,999
4,5	—	—	0,999	—

* Существующие значения интегральной функции распределения основного удельного сопротивления движению приняты по данным Пособия по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств⁴.

** Для новых данных легкой весовой категории максимальное значение основного удельного сопротивления движению составляет 3,6 Н/кН, которое попадает в диапазон от 3,5 до 4,0 Н/кН, установленный по существующей плотности распределения.

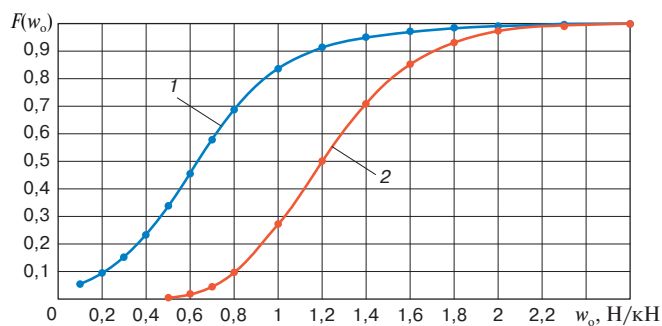


Рис. 1. Соотношение существующих и новых графиков функций распределения случайной величины w_0 для тяжелой весовой категории вагонов:

1 — новые значения; 2 — существующие значения

Fig. 1. Correlation of existing and new graphs of distribution functions of random variable w_0 for heavyweight cars:

1 — new values; 2 — existing values

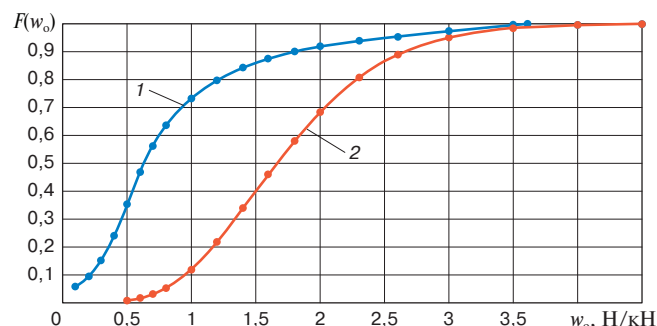


Рис. 2. Соотношение существующих и новых графиков функций распределения случайной величины w_0 для легкой весовой категории вагонов:

1 — новые значения; 2 — существующие значения

Fig. 2. Correlation of existing and new graphs of distribution functions of random variable w_0 for lightweight cars:

1 — new values; 2 — existing values

⁴ Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств / П. И. Дыдышко [и др.]. М.: Транспорт, 1994. 220 с.

типов, и для увеличения объема выборки целесообразно провести подобные эксперименты на других сортировочных горках в различных условиях эксплуатации. Однако приведенные на рис. 1 и 2 соотношения интегральных функций распределения в целом показывают значительные отклонения случайной величины w_0 для современного парка вагонов от используемых в настоящее время значений.

Для определения параметров «расчетных бегунов» по полученным новым интегральным функциям распределения использованы вероятности появления соответствующего типа «расчетного бегуна»⁵. Определение вероятностей, соответствующих характеристикам «хорошего» и «очень хорошего» (ОХ-85 и ОХ-100) бегунов, производилось по существующей интегральной функции распределения $F(w_0)$ для тяжелой весовой категории вагонов по формуле

$$P_{\text{ОХ}} = F(w_0). \quad (2)$$

Определение вероятностей появления «плохого» и «очень плохого» бегунов производилось по существующей интегральной функции распределения $F(w_0)$ для легкой весовой категории вагонов по формуле

$$P_{\text{ОП}} = 1 - F(w_0). \quad (3)$$

Вероятности появления «расчетных бегунов» в перерабатываемом вагонопотоке соответствующей весовой категории согласно существующим нормативам приведены в табл. 2.

Для определения параметров «расчетных бегунов», соответствующих современным условиям эксплуатации, предлагается использовать значения вероятностей, приведенные в табл. 2. По данным вероятностям, но с использованием новых интегральных функций распределения, определены значения основного удельного сопротивления движению для «расчетных бегунов» каждого типа. Фрагменты новых интегральных функций распределения случайной величины w_0 , по которым произведено определение числовых характеристик «расчетных бегунов», приведены:

- для тяжелой весовой категории (начальная часть функции) — на рис. 3;
- для легкой весовой категории (конечная часть функции) — на рис. 4.

Таким образом, определены числовые характеристики «расчетных бегунов», соответствующие современному парку вагонов (табл. 3), при этом:

- значения w_0 для «расчетных бегунов» ОП и ОХ-100 (а также ОХ-85) приняты по крайним границам диапазонов допустимых значений основного удельного сопротивления движению соответственно для легкой и тяжелой весовых категорий;

Таблица 2

Значения вероятностей появления «расчетных бегунов», соответствующие существующим функциям распределения

Table 2

Probability values for appearance of “calculated runners”, corresponding to the existing distribution functions

Параметр	Тип «расчетного бегуна»			
	ОП	П	Х	ОХ-85
Основное удельное сопротивление движению (Н/кН)	4,5	4,0	0,8	0,5
Значение интегральной функции распределения вероятностей основного удельного сопротивления движению вагона	0,999	0,996	0,095	0,004
Вероятность появления в перерабатываемом вагонопотоке «расчетного бегуна» соответствующего типа	0,001	0,004	0,095	0,004

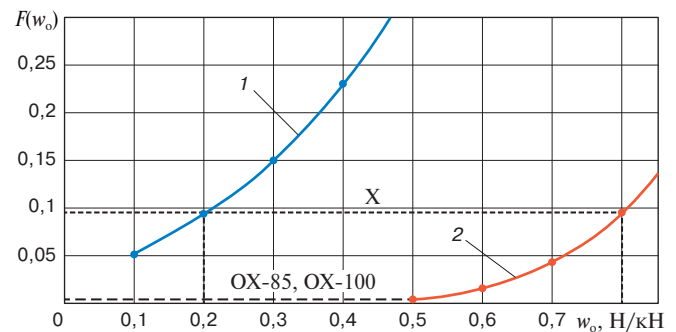


Рис. 3. Фрагмент начальной части интегральной функции распределения случайной величины w_0 тяжелой весовой категории вагонов для определения параметров «расчетных бегунов» Х, ОХ-85 и ОХ-100:

1 — новые значения; 2 — существующие значения

Fig. 3. Fragment of initial part of integral distribution function of random variable w_0 of heavyweight cars to determine the parameters of “calculated runners” Х, ОХ-85 and ОХ-100:

1 — new values; 2 — existing values

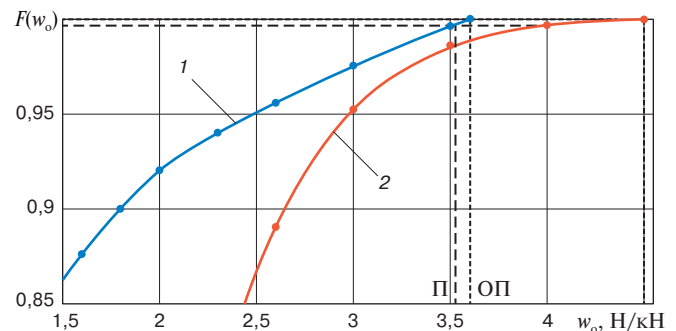


Рис. 4. Фрагмент конечной части интегральной функции распределения случайной величины w_0 легкой весовой категории вагонов для определения параметров «расчетных бегунов» П и ОП:

1 — новые значения; 2 — существующие значения

Fig. 4. Fragment of final part of integral distribution function of random variable w_0 of lightweight cars to determine the parameters of “calculated runners” П and ОП:

1 — new values; 2 — existing values

⁵ Там же.

Таблица 3

Соотношение существующих и новых числовых характеристик «расчетных бегунов»

Table 3

Ratio of existing and new numerical characteristics of “calculated runners”

Тип «расчетного бегуна»	Масса	Основное удельное сопротивление движению, Н/кН	
		Существующее значение*	Новое значение
ОП	22	4,5	3,6
П	25	4,0	3,5
Х	70	0,8	0,2
ОХ-85	85	0,5	0,1
ОХ-100	100	0,5	0,1

* Существующие значения приняты в соответствии с Пособием по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств (1994).

• значение w_0 для бегуна П принято по существующей вероятности появления «расчетного бегуна» в перерабатываемом вагонопотоке (табл. 2) с округлением до значения 3,5 Н/кН;

• значение w_0 для бегуна Х принято 0,2 Н/кН по графику интегральной функции распределения тяжелой весовой категории; данный параметр может также определяться с использованием функции распределения среднетяжелой весовой категории (так как масса такого бегуна составляет 70 т и попадает в диапазон изменения масс этой категории), для которой объем имеющейся выборки является недостаточным.

Обсуждение и заключение. На основании выполненных исследований авторами получены новые значения параметров «расчетных бегунов», которые составляют:

- для ОП: масса 22 т, основное удельное сопротивление 3,6 Н/кН;
- для П: масса 25 т, основное удельное сопротивление 3,5 Н/кН;
- для Х: масса 70 т, основное удельное сопротивление 0,2 Н/кН;
- для ОХ-85: масса 85 т, основное удельное сопротивление 0,1 Н/кН;
- для ОХ-100: масса 100 т, основное удельное сопротивление 0,1 Н/кН.

Полученные данные значительно отличаются от используемых в настоящее время числовых характеристик «расчетных бегунов», что отразится на результатах конструктивных и технологических расчетов, выполняемых при проектировании сортировочных горок. При этом необходимо отметить, что предлагаемые числовые характеристики «расчетных бегунов» являются предварительными и должны быть уточнены

с учетом увеличения объемов выборки, что может привести к изменению конфигурации начальных и конечных частей интегральных функций распределения для тяжелой, легкой, а при необходимости и среднетяжелой весовых категорий.

Для включения новых значений основного удельного сопротивления движению в правила и нормы проектирования сортировочных устройств требуются дополнительные исследования с целью уточнения параметров распределений основного удельного сопротивления движению и характеристик «расчетных бегунов», соответствующих современному парку вагонов. Исследования по определению новых значений основного удельного сопротивления движению вагонов рекомендуется провести на сортировочных горках разной мощности, расположенных в различных климатических зонах, с обработкой статистических данных по скатыванию отцепов как на участках спускной части горки, так и на путях сортировочных парков. Исследования рекомендуется провести как в летний, так и в зимний периоды.

Использование новых числовых характеристик «расчетных бегунов» рекомендуется при выполнении анализа вариантов проектных решений по высоте горки и конструктивным параметрам продольного профиля. До момента утверждения новых числовых характеристик «расчетных бегунов» определение предельных значений высоты сортировочной горки, проверки мощности тормозных позиций и интервалов на разделительных элементах необходимо производить с использованием существующих значений основного удельного сопротивления движению вагонов.

Благодарности: авторы выражают благодарность коллегам Ростовского филиала АО «НИИАС», предоставившим статистические данные комплекса компьютерного зрения по результатам скатывания отцепов в сортировочном парке для определения основного удельного сопротивления движению современного парка вагонов. Благодарность от авторов также выражается рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the colleagues of the Rostov branch of the Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation, who provided statistical data of the computer vision system on the results of rolling up the uncouples in the sorting fleet to determine the main specific resistance to the movement of the modern fleet of cars, and to reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: публикация осуществлена в том числе в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Finding: the publication was made as part of the implementation of the JSC “Russian Railways” grant for the development of scientific and pedagogical schools in the field of railway transport.

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. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / В. П. Волков [и др.]. М.: Транспорт, 1975. 102 с. [Volkov V. P., Starshov I. P., Sotnikov E. A., Arbuzin A. I. *Resistance to the movement of freight cars when rolling down hills*. Moscow: Transport Publ.; 1975. 102 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/uhzuzh>.
2. Применение цифровых моделей и средств спутниковой навигации для определения основного сопротивления движению грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко [и др.] // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Второй Междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 19–22 апреля 2023 г. Ташкент: Ташкентский гос. транспорт. ун-т, 2023. С. 62–69 [Boronenko Yu. P., Krohn I. R., Rakhimov R. V., Ruzmetov Ya. O. Application of digital models and satellite navigation tools to determine the main resistance to the movement of freight cars. In: *Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference "Railway rolling stock: problems, solutions, prospects"*, 19–22 April 2023, Tashkent. Tashkent: Tashkent State Transport University; 2023. p. 62–69 (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/cgjcfe>.
3. Djabbarov S., Saidivaliev S., Abdullayev B., Gayipov A., Rakhmatov K., Soboleva I. Study of the kinematic characteristics of the motion of the car from the top to the design point. In: *E3C Web of Conferences*. Vol. 402: *International Scientific Siberian Transport Forum "TransSiberia 2023"*, 16–19 May 2023, Novosibirsk. [s. l.]; 2023. p. 04010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340204010>.
4. Фролов А. Н., Ботсманов Б. В. Сопротивление вагонов при скатывании с горки. М.: Трансжелдориздат, 1939. 132 с. [Frolov A. N., Botsmanov B. V. *Resistance of cars when rolling down a hill*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1939. 132 p. (In Russ.)].
5. Бессоненко С. А., Гунбин А. А., Климов А. А. Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4(63). С. 62–68 [Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A. Study of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling off a hump based on field observations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022;(4):62-68. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/gserob>.
6. Климов А. А. Метод определения сопротивлений движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений и цифровых баз данных // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы междунар. науч.-практ. конф., Москва, 28 сентября 2022 г. М.: РУТ, 2022. С. 300–305 [Klimov A. A. Method for determining the resistance to the movement of cuts when rolling off a hump based on field discoveries and digital databases. In: *Digital transformation of transport: problems and prospects: Proceedings of the international scientific and practical conference*, 28 September 2022, Moscow. Moscow: RUT; 2022. p. 300–305. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/cditgz>.
7. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочных горках / С. А. Бессоненко [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(64). С. 52–61 [Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A., Kornienko K. I., Olgeizer I. A., Sukhanov A. V. Probability distributions of specific resistance to the movement of cuts on hump humps. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(1):52-61. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/dwanws>.
8. Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / С. А. Бессоненко [и др.] // Известия Транссиба. 2023. № 1(53). С. 53–62 [Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A., Kornienko K. I., Olgeizer I. A., Shabelnikov A. N. Study of the parameters of the main specific resistance to the movement of cars when rolling off a hump. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023;(1):53-62. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ktvbnr>.
9. Распределения вероятностей удельного сопротивления движению разных типов вагонов в сортировочном парке / С. А. Бессоненко [и др.] // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. 2022. № 1(4). С. 12–17 [Bessonenko S. A., Gunbin A. A., Klimov A. A., Kornienko K. I., Olgeizer I. A. Probability distributions of specific resistance to movement of different types of cars in a marshalling yard. *Problemy perspektivnogo razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov*. 2022;(1):12-17. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rizpzb>.
10. Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов / А. Е. Хатламаджиян [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 3. С. 8–11 [Khatlamadzhian A. E., Olgeizer I. A., Sukhanov A. V., Borisov V. V. Computer vision for monitoring sorting processes. *Automation, communication, informatics*. 2021;(3):8-11. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/gosiky>.
11. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 46–53 [Olgeizer I. A., Sukhanov A. V., Lyashchenko A. M., Glazunov D. V. Computer vision as a way to intellectualize hump automation systems. *Engineering and Automation Problems*. 2022;(1):46-53. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/loqjvh>.
12. Сортировочная станция: из прошлого в будущее / А. Н. Шабельников [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2020. № 9. С. 18–21 [Shabelnikov A. N., Kobzev V. A., Olgeizer I. A., Rogov S. A. Marshalling yard: from the past to the future. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2020;(9):18-21. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/gtkzjt>.
13. Panchenko S., Siroklyn I., Lapko A., Kameniev A., Zmii S. Improvement of the accuracy of determining movement parameters of cuts on classification humps by methods of video analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016;(3):25-30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76103>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Анатольевич БЕССОНЕНКО,

д-р техн. наук, профессор, кафедра управления эксплуатационной работой, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Антон Андреевич ГУНБИН,

канд. техн. наук, доцент, кафедра железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 723167, <https://orcid.org/0000-0002-2877-1136>

Александр Александрович КЛИМОВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра железнодорожных станций и узлов, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 728266, <https://orcid.org/0000-0003-1421-0976>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. BESSONENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Track Maintenance Management, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Anton A. GUNBIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Railway Stations and Junctions, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 723167, <https://orcid.org/0000-0002-2877-1136>

Alexander A. KLIMOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Railway Stations and Junctions, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 728266, <https://orcid.org/0000-0003-1421-0976>

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Анатольевич БЕССОНЕНКО. Методика выполнения натурных наблюдений за процессом скатывания отцепов с сортировочной горки. Планирование экспериментов и обработка полученных результатов (34%).

Антон Андреевич ГУНБИН. Обработка статистических данных о результатах скатывания отцепов с сортировочной горки по данным комплекса компьютерного зрения. Построение итоговых кривых интегральных функций распределения основного удельного сопротивления движению для тяжелой и легкой весовых категорий вагонов (33%).

Александр Александрович КЛИМОВ. Методика определения числовых характеристик «расчетных бегунов». Редактирование и подготовка текста рукописи (33%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey A. BESSONENKO. Methodology for performing field observations of the process of rolling cuts from a gravity hump. Planning of experiments and processing of the obtained results (34%).

Anton A. GUNBIN. Processing of statistical data on the results of rolling cuts from the gravity hump based on data from the “Computer Vision” system. Construction of the final curves of the integral distribution functions of the main specific resistance to movement for heavy- and lightweight cars (33%).

Alexander A. KLIMOV. Methodology for determining the numerical characteristics of “calculated runners”, article editing and preparation (33%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024, рецензия от первого рецензента получена 02.02.2024, рецензия от второго рецензента получена 09.02.2024, принята к публикации 16.02.2024.

The article was submitted 30.01.2024, first review received 02.02.2024, second review received 09.02.2024, accepted for publication 16.02.2024.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

УСТРОЙСТВО ФИКСАЦИИ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ДЛЯ ОТВОДА КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ НАД ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ПУТЯМИ

А. А. Крылов, А. А. Царьков, П. О. Мусерский,
М. И. Мехедов, В. А. Нелюб,
А. Н. Калинин, И. Д. Золотаренко

Изобретение относится к контактной сети. Устройство фиксации контактного провода для отвода контактной подвески над железнодорожными путями содержит крышку с плоской верхней поверхностью, полый корпус, элемент усиления и накладку. Крышка выполнена с возможностью соединения с полым корпусом. Полый корпус имеет дно, на внутренней поверхности корпуса в нижней его части выполнены выступы для размещения в корпусе элемента усиления. На внешней поверхности дна корпуса по всей его длине выполнен паз для размещения в нем и фиксации контактного провода. Фиксация контактного провода осуществляется

при помощи накладок, выполненных с возможностью приклепления на нижнюю часть внешней поверхности корпуса. Причем крышка, корпус и элемент усиления выполнены из композитных материалов, а накладки — из нержавеющей стали с защитным напылением из полиуретанового лака. Технический результат изобретения заключается в повышении надежности и прочности устройства.

Патент на изобретение RU 2803210 C1, 11.09.2023.

Заявка № 2023107123 от 24.03.2023.

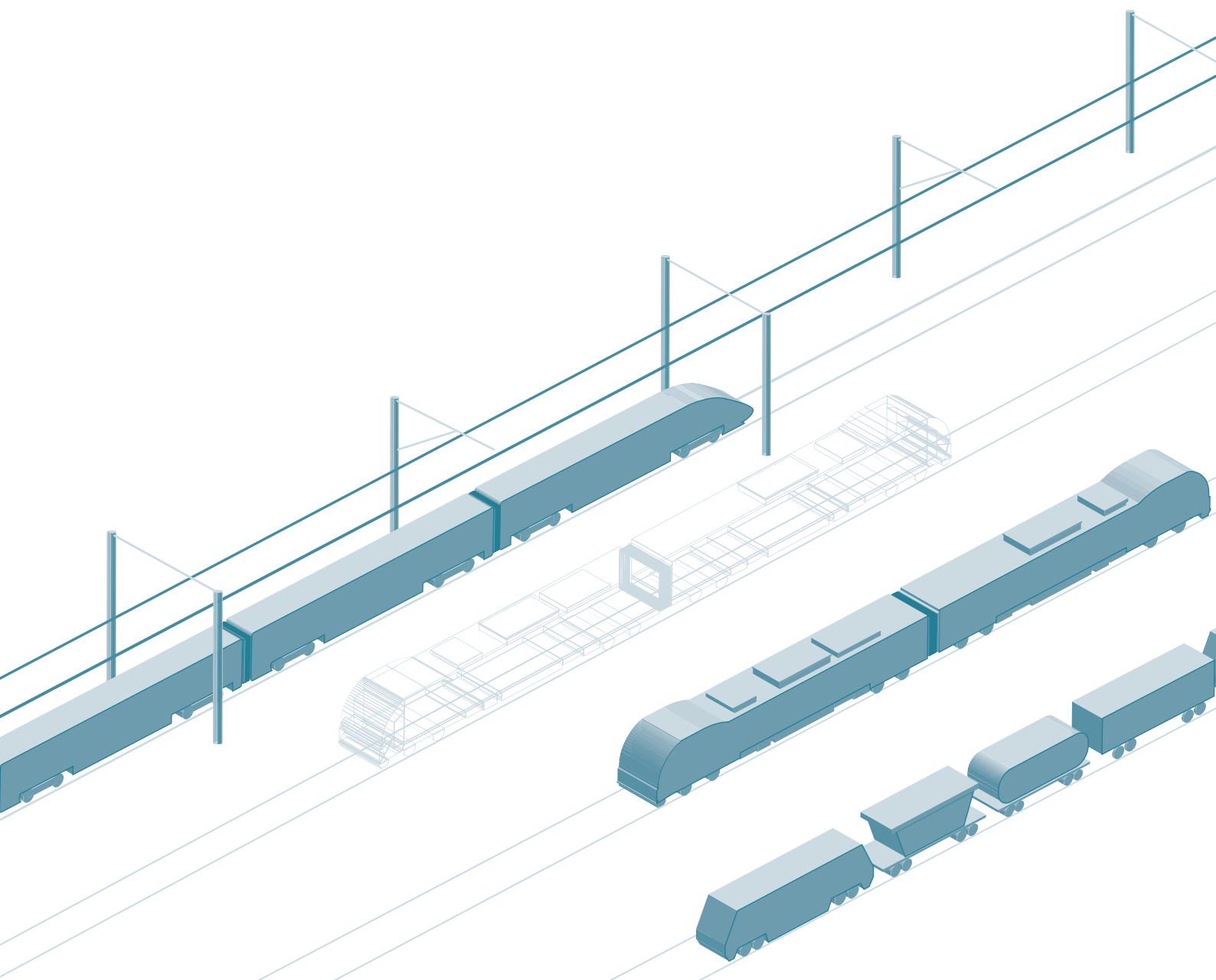
<https://elibrary.ru/item.asp?id=54659507>

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT





УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная статья
УДК 621.391.8
EDN: <https://elibrary.ru/visozl>



О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа

Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин✉

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Помехи, действующие в канале автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа, искажают передаваемый сигнал и приводят к сбоям в работе сигнализации. Для снижения влияния помех на функционирование канала ранее был предложен приемник с квадратурными каналами и варианты его реализации с применением нелинейного преобразования сигналов в одном или двух сечениях приемника. Цель исследования — выявление наилучших вариантов реализации квадратурного приемника.

Материалы и методы. Основной метод исследования — имитационное моделирование на ЭВМ процесса функционирования исследуемых приемников в условиях воздействия гармонической помехи от линии электропередачи. Для этого в среде визуального программирования Simulink разработаны имитационные модели приемников, использована имитационная модель гармонической помехи и проведены эксперименты по оценке показателя помехоустойчивости, в качестве которого выбрана длительность временного интервала, на котором наблюдались ошибки в работе приемников.

Результаты. Определено влияние нелинейного преобразования сигналов на помехоустойчивость приемников в условиях воздействия гармонической помехи.

Обсуждение и заключение. Исследование показало, что среди всех рассмотренных вариантов реализации квадратурного приемника по критерию максимальной помехоустойчивости при воздействии гармонической помехи наиболее предпочтительным является приемник с зоной нечувствительности. Незначительно уступает ему приемник с комбинированным подавителем помех и зоной нечувствительности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: локомотивы, автоматическая локомотивная сигнализация, квадратурный приемник, помехоустойчивость, нелинейное преобразование сигналов, высоковольтная линия электропередачи, гармоническая помеха

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 70–80.

✉ a.hohrin@samgups.ru (А. С. Хохрин)

© Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., 2024

Original article

UDK 621.391.8

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



Reducing power line interference with the continuous automatic cab signalling channel

Ruslan R. Yusupov, Alexey S. Khokhrin✉

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Interference in the continuous automatic cab signalling channel distorts transmitted signals and causes signalling malfunctions. Reduction of interference in the channel involved a previously proposed receiver with quadrature channels and its implementations with non-linear signal transformation in one or two sections of the receiver. The research is intended to find the best implementations of the quadrature receiver.

Materials and methods. The research uses a computer simulation of the operation of the studied receivers under the influence of harmonic interference from a power line. For this purpose, the authors used Simulink visual programming environment and developed receiver simulations, applied the harmonic interference simulation model and conducted experiments to assess noise immunity expressed as a time interval showing receiver malfunction.

Results. The researchers determined the effect of non-linear signal transformation on the harmonic noise immunity of the receivers.

Discussion and conclusion. The research shows that the receiver with a deadband is the most preferable of all considered variants of quadrature receivers in terms of maximum harmonic noise immunity. The receiver with combined interference suppressor and deadband is slightly inferior.

KEYWORDS: locomotives, automatic cab signalling, quadrature receiver, noise immunity, non-linear signal transformation, high-voltage power line, harmonic interference

FOR CITATION: Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Reducing power line interference with the continuous automatic cab signalling channel. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):70-80. (In Russ.).

Введение. Высокая эффективность и безопасность перевозочного процесса на сети железных дорог Российской Федерации обеспечиваются системами интервального регулирования движения поездов (СИРДП). К таким системам относятся автоблокировка, автоматическая локомотивная сигнализация, диспетчерская централизация и др. Из 85,6 тыс. км эксплуатационной длины магистральных железных дорог около 63 тыс. км оборудовано автоблокировкой и системой автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН)¹.

В индуктивно-рельсовой линии связи, по которой осуществляется передача сигнала АЛСН на локомотив, действует комплекс разнообразных помех (импульсных, флуктуационных и гармонических), источниками которых являются тяговый ток, высоковольтные ЛЭП, намагниченность рельсов и др. Эти помехи искажают сигнал, передаваемый с пути на локомотив, что приводит к ошибкам в работе локомотивного приемника сигналов АЛСН [1]. В результате возникают сбои в работе системы АЛСН, которые выражаются в несоответствии сигнальных показаний локомотивного и напольного светофоров. При этом возможна выработка ложного приказа, разрешающего движение со скоростью выше допустимой по соображениям безопасности. Выработка приказа, который ограничивает скорость движения сильнее, чем этого требует текущая поездная ситуация, может привести к задержке поезда, нарушению графика движения, росту энергозатрат на ведение поездов и другим негативным последствиям. Кроме того, необходимость ответных действий локомотивной бригады на возникший сбой в работе АЛСН приводит к повышению психофизиологической нагрузки, утомляемости и снижению внимания, что негативно сказывается на безопасности движения поездов.

По данным Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре — филиала ОАО «РЖД» (ПКБИ РЖД), в 2022 г. на сети железных дорог Российской Федерации зафиксировано 47 774 сбоя в работе устройств АЛСН, из них 22 977 сбоев (48 %) — это сбои второй категории, т. е. одиночные сбои с неустановленной причиной при исправном состоянии локомотивных и путевых устройств². Одной из причин таких сбоев является воздействие помех. С 2017 г. доля сбоев второй категории в работе АЛСН увеличилась с 38,3 до 48,1 %. В отдельную (третью) категорию были отнесены

технологически обоснованные сбои, в том числе сбои в местах пересечения железнодорожной линии с ЛЭП и другими источниками помех. Доля последних в общем количестве сбоев третьей категории с 2015 по 2022 г. увеличилась с 36,2 до 38,9 %. Таким образом, более 68 % сбоев в работе АЛСН вызвано воздействием помех.

В современных локомотивных устройствах безопасности, таких как КЛУБ-У [2], БЛОК [3], ДКСВ-М [4] и др., реализована функция приема сигналов АЛСН. Для снижения влияния помех на достоверность приема сигналов АЛСН предлагаются различные способы и технические решения. Так, авторами патента³ был предложен способ повышения достоверности распознавания сигналов в условиях воздействия внешних аддитивных сосредоточенных помех путем выделения из модулированного сигнала АЛСН двух сигналов с частотами верхней и нижней боковых полос, средняя мощность которых сравнивается между собой. После этого выбирается сигнал с меньшей величиной средней мощности. Такой сигнал определяется как сигнал, не подверженный воздействию помех. В работе [5] авторами предпринята попытка применить в приемном устройстве АЛСН способ корреляционной дешифрации сигналов, потенциально обеспечивающий наибольшую достоверность различения амплитудно-манипулированных сигналов АЛСН. Предложенный способ основан на методе вычисления коэффициента взаимной корреляции принимаемого сигнала и эталонных кодовых комбинаций и реализуется на универсальной микропроцессорной системе. Этот способ учитывает известные особенности принимаемого сигнала, что позволяет добиться более надежного приема. Эффективность предложенного способа дешифрирования числовых кодовых сигналов АЛСН была подтверждена во время лабораторных испытаний, однако сведений о результатах натурных испытаний в реальных условиях эксплуатации или о внедрении разработанного устройства на сети железных дорог России не найдено. Авторами статьи [6] разработаны метод и программно-алгоритмические средства цифровой узкополосной фильтрации сигнала числового кода для повышения эффективности работы АЛСН в условиях действия электромагнитных помех большой интенсивности. Результаты полунатурных испытаний с использованием имитационного моделирования на ЭВМ показали, что предложенное решение обеспечивает выделение полезного сигнала числового кода

¹ ОАО «РЖД» сегодня [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9360?redirected> (дата обращения: 04.10.2023).

² Положение о порядке служебного расследования, учета и анализа сбоев в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации и систем автоматического управления торможением поезда [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.05.2016 № 1011р. URL: https://base.garant.ru/71448318/#block_1000 (дата обращения: 29.09.2023).

³ Патент № 2629831 Российская Федерация, МПК В61L 25/00. Способ защиты устройств автоматической локомотивной сигнализации от аддитивных сосредоточенных помех: № 2016137520: заявл. 20.09.2016; опубл. 04.09.2017 / Архипов А. С., Горчаков А. А., Коляда В. А. [и др.]. 9 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/oyaloa>.

в условиях действия помех с уровнем отношения сигнал/помеха, достигающим значений 0,6 при действии стационарной гармонической помехи и 0,4 при действии случайной импульсной помехи. Результаты проверки эффективности работы устройства авторам не известны.

Одним из направлений повышения помехоустойчивости АЛСН является компенсация помех на входе локомотивного приемного устройства. Так, для компенсации помех в [7, 8] авторы предлагают использовать многоканальный адаптивный фильтр. Суть разработки заключается в разделении сигнала и помехи с последующей компенсацией последней. Отличительной особенностью предложенных для компенсации помех адаптивных фильтров, существенно расширяющей их функциональные возможности, является использование в алгоритмах интервалов адаптации априорной информации о наличии пауз в сигналах. Эффективность предлагаемого способа и достоверность полученных результатов подтверждена путем моделирования на ЭВМ.

Для снижения влияния помех на устойчивость функционирования канала АЛСН авторами настоящей работы ранее был предложен приемник сигналов с квадратурными каналами (квадратурный приемник) [9] как альтернатива приемнику сигналов АЛСН с линейным амплитудным детектированием и нелинейным устройством подавления гармонической помехи (далее — АДНП), применяемому в составе современных микропроцессорных локомотивных устройств безопасности.

Для борьбы с помехами было предложено использование блоков нелинейного преобразования сигнала (БНП) в двух сечениях квадратурного приемника: комбинированный подавитель импульсных и флуктуационных помех⁴ на входе приемника и блок с зоной нечувствительности [10] на выходе квадратурного коррелятора. Для независимой оценки эффективности каждого из предложенных решений ранее посредством имитационного моделирования на ЭВМ были проведены статистические эксперименты и получены количественные оценки помехоустойчивости при воздействии флуктуационных, импульсных и гармонических помех для АДНП и следующих вариантов реализации квадратурного приемника:

- 1) квадратурного приемника без БНП (далее — КП);
- 2) квадратурного приемника с блоком с зоной нечувствительности (далее — КПЗ);
- 3) квадратурного приемника с комбинированным подавителем помех, в состав которого входят схема ШОУ (широкополосный фильтр — ограничитель — узкополосный фильтр) и схема бланкирования (далее — КПП);

4) квадратурного приемника с комбинированным подавителем помех и блоком с зоной нечувствительности (далее — КППЗ).

Результаты вычислительного эксперимента при воздействии на перечисленные приемники импульсных помех от постоянного тягового тока представлены в работе [11].

Данная работа является продолжением цикла исследований, направленных на выявление наиболее помехоустойчивого и безопасного из перечисленных выше приемников сигналов АЛСН. В ней впервые представлены полученные экспериментально сведения о помехоустойчивости этих приемников при воздействии гармонической помехи от высоковольтной ЛЭП. Целью исследования является выявление наилучших вариантов реализации квадратурного приемника.

Материалы и методы. Суть вычислительных экспериментов заключалась в подаче на вход имитационных моделей всех приемников одной и той же аддитивной смеси сигнала и гармонической помехи и определении длительности временного интервала, в течение которого наблюдались ошибки в приеме. В качестве модели гармонической помехи от ЛЭП использовалась имитационная модель такой помехи при следующих параметрах:

- расстояние между проекциями на горизонтальную плоскость фазных проводов ЛЭП принято равным 20 м;
- высота подвеса фазных проводов над горизонтальной плоскостью принята равной 15 м;
- амплитудное значение тока в фазных проводах принято равным 3000 А.

Приведенные значения соответствуют показателям высоковольтной ЛЭП с горизонтальным расположением проводов.

Методика проведения экспериментов повторяет методику, представленную в работе [12]. В качестве количественного показателя помехоустойчивости приемников используется длительность временного интервала $T_{\text{ош}}$, в течение которого наблюдались ошибки в приеме (рис. 1). Использование $T_{\text{ош}}$ как количественного показателя помехоустойчивости в эксперименте с гармонической помехой от высоковольтной линии электропередачи обусловлено характером проявления гармонической помехи от ЛЭП и алгоритмом дешифрации кодовых сигналов канала АЛСН, реализованным в аппаратуре КЛУБ-У. Гармоническая помеха воздействует на сигнал АЛСН в течение интервала времени, равного времени нахождения локомотива в зоне влияния ЛЭП. Протяженность этой зоны зависит от конструкции ЛЭП, угла ее пересечения с железнодорожной линией, силы тока в проводах и других

⁴ Патент № 218341 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Приемник автоматической локомотивной сигнализации: № 2023110361: заявл. 22.04.2023; опубл. 23.05.2023 / Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. 13 с. EDN: <https://www.elibrary.ru/ywdacj>.

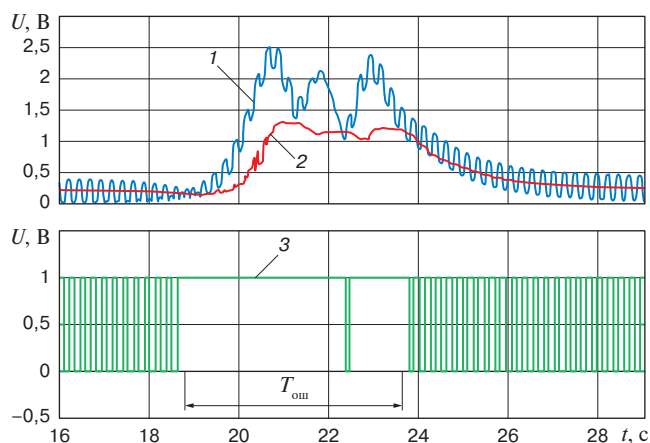


Рис. 1. Осциллограммы, поясняющие способ определения длительности временного интервала $T_{\text{ош}}$: 1 — огибающая принимаемого тестового сигнала; 2 — сигнал плавающего порога принятия решения; 3 — выходной сигнал приемника

Fig. 1. Oscillograms explaining the method of determining the duration of the time interval $T_{\text{ош}}$: 1 — received test signal envelope curve; 2 — floating decision threshold signal; 3 — receiver output signal

факторов. Время нахождения локомотива в зоне влияния ЛЭП обратно пропорционально скорости поезда. Согласно алгоритму дешифрации кодовых сигналов АЛСН в КЛУБ-У смена огней на локомотивном индикаторе осуществляется с задержкой времени 6 с⁵, необходимой для накопления трех кодовых комбинаций. Если значение $T_{\text{ош}}$ не превысит эту задержку, то появления ложного показания на локомотивном индикаторе (сбоя в работе АЛСН) в отсутствии других негативных факторов не будет; в случае превышения задержки произойдет сбой. Таким образом, величина $T_{\text{ош}}$ характеризует способность канала АЛСН функционировать в условиях воздействия гармонической помехи от ЛЭП и может использоваться в качестве косвенного показателя помехоустойчивости приемников.

В экспериментах с гармонической помехой от ЛЭП управляемыми факторами являются амплитуда сигнала на входе приемников U_c , коэффициент асимметрии приемного тракта K_a , скорость поезда v_n в зоне влияния ЛЭП и угол пересечения оси ЛЭП с железнодорожной линией φ_L .

В вычислительных экспериментах значение U_c было принято равным 280 мВ среднеквадратического значения, что соответствует номинальному значению

напряжения сигнала на входе локомотивного приемника при электрической тяге постоянного тока [13].

Значение K_a принято равным 40 %, что соответствует математическому ожиданию коэффициента асимметрии при движении локомотива⁶. Такое большое значение K_a обусловлено тем, что оно включает в себя не только и не столько продольную асимметрию рельсовой линии (нормируемую на уровне 4 % при электротяге переменного тока и 6 % при электротяге постоянного тока), сколько асимметрию индуктивной линии, значение которой определяется в статике асимметрией электрических параметров приемных катушек и асимметрией их подвеса на кузове локомотива относительно осей рельсов, а в динамике — неодинаковым смещением левой и правой катушек относительно осей рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях при движении в кривой, боковой качке и галоупировании кузова локомотива.

В качестве тестового сигнала, подаваемого на входы приемников, было использовано несущее гармоническое колебание с частотой 50 Гц, модулированное последовательностью прямоугольных импульсов со скважностью 2 и периодом колебания 0,24 с. Длительности импульсов и интервалов такого сигнала равны длительности короткого интервала сигнала кодовой комбинации «3». Это позволило уменьшить объем проводимых экспериментов и оценить $T_{\text{ош}}$ для всех исследуемых приемников с погрешностью, не превышающей длительность одного элемента сигнала (0,12 с).

Поскольку $T_{\text{ош}}$ зависит как от скорости v_n , так и от угла φ_L , то для оценки влияния каждого из этих факторов эксперименты необходимо провести так, чтобы получить зависимости $T_{\text{ош}}$ от одного из этих факторов при фиксированном значении другого фактора:

$$T_{\text{ош}} = f(\varphi_L) \Big|_{v_n = \text{const}}; \quad (1)$$

$$T_{\text{ош}} = f(v_n) \Big|_{\varphi_L = \text{const}}. \quad (2)$$

Для определения указанных зависимостей выбраны следующие значения аргументов: $v_n = 2,5; 5; \dots; 40$ м/с и $\varphi_L = 90; 85; \dots; 30^\circ$.

Значения $T_{\text{ош}}$ в экспериментах определялись по осциллограммам сигнала на выходе приемников. На рис. 1 для пояснения способа определения $T_{\text{ош}}$ представлены осциллограммы, на которых показаны

⁵ Инструкция по эксплуатации локомотивных устройств безопасности [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.02.2019 № 183/р. Доступ из АСПИЖТ.

⁶ Пыров А. Е. Исследование функционирования автоматической локомотивной сигнализации для управления движением поездов на железных дорогах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14. М., 1975. 253 с.

графики, полученные для квадратурного приемника при $v_n = 20$ м/с и $\varphi_d = 75^\circ$. На осциллограммах по горизонтальной оси отложено время t в секундах, по вертикальной — напряжение сигнала U в вольтах. Выходной сигнал приемника (нижняя осциллограмма на рис. 1) формируется входящим в его состав пороговым решающим устройством. Оно осуществляет логическое сравнение выделяемой на выходе квадратурного коррелятора огибающей принимаемого тестового сигнала (кривая 1 на верхней осциллограмме) с плавающим порогом принятия решения (кривая 2 на верхней осциллограмме). Порог принятия решения формируется на уровне 0,6 от амплитуды огибающей (что почти соответствует критерию максимального правдоподобия при обнаружении амплитудно-манипулированного сигнала), и с некоторой инерционностью отслеживаются изменения этой амплитуды.

Отсчет длительности временного интервала $T_{\text{ош}}$ начинается в момент возникновения первой ошибки в приеме элементарной посылки тестового сигнала (соответствует моменту времени 18,9 с на графиках), а заканчивается в момент восстановления правильного приема элементарной посылки (соответствует моменту времени 23,7 с на графиках). Таким образом, значение $T_{\text{ош}}$ на рис. 1 составит около 4,8 с.

Оценка помехоустойчивости приемников при изменении угла пересечения с ЛЭП и фиксированной скорости движения поезда. На рис. 2–5 представлены результаты первого эксперимента — графики зависимости (1), полученные для всех исследованных приемников при $v_n = 2,5; 7,5; 20; 30$ м/с соответственно, как наиболее показательные по характеру их изменения. Графики зависимости (1), полученные при скоростях поезда $v_n > 30$ м/с, имеют вид, аналогичный представленным на рис. 5.

В табл. 1 представлены значения выигрыша в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП, полученные по результатам эксперимента. Выигрыш в помехоустойчивости определим как отношение значения $T_{\text{ош}}$ для АДНП к $T_{\text{ош}}$ для исследуемого приемника:

$$B = \frac{T_{\text{ош АДНП}}}{T_{\text{ош КП (КПП, КПЗ, КППЗ)}}}.$$

Диапазон значений выигрыша (минимальное и максимальное значения) указан для исследованного диапазона значений φ_d . Наихудшие результаты по помехоустойчивости (наименьшие значения выигрыша) в таблице выделены желтым цветом, а наилучшие (наибольшие значения выигрыша) — зеленым.

Оценка помехоустойчивости приемников при изменении скорости движения поезда и фиксированном значении угла пересечения с ЛЭП. Наиболее часто встречающееся значение угла пересечения с ЛЭП на железных дорогах СССР составляло 60° . По данным

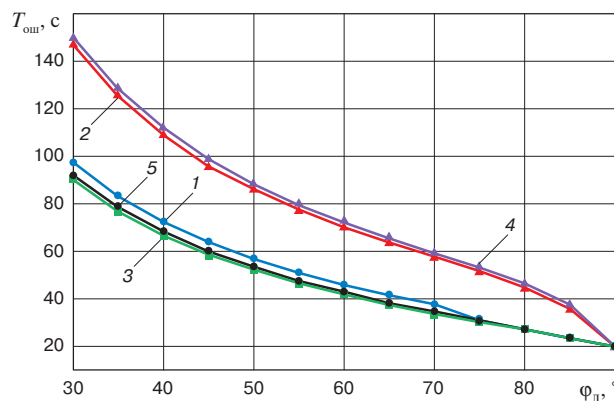


Рис. 2. Графики зависимости (1) при $v_n = 2,5$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 2. Dependence diagrams (1) at $v_n = 2.5$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN (broadband filter – limiter – narrowband filter) and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

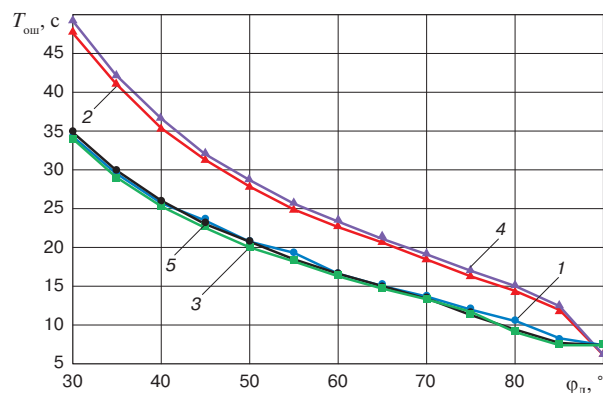


Рис. 3. Графики зависимости (1) при $v_n = 7,5$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 3. Dependence diagrams (1) at $v_n = 7.5$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

службы автоматики и телемеханики Куйбышевской железной дороги, в настоящее время наибольшее количество пересечений железнодорожных линий с ЛЭП проходит под углом 90° . Наиболее показательны по характеру их изменения зависимости (2), полученные в результате второго эксперимента при значениях $\varphi_d = 30; 60; 90^\circ$. Они представлены на рис. 6–8 соответственно.

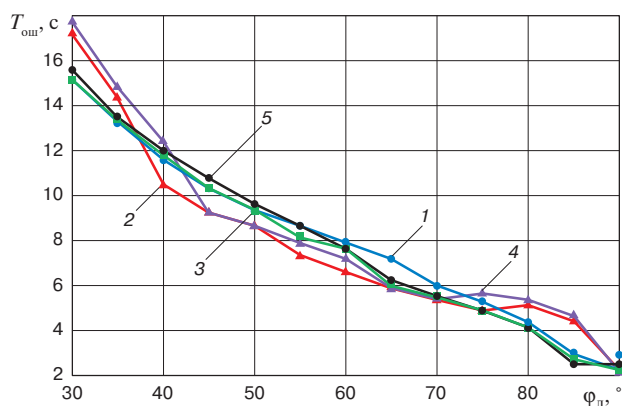


Рис. 4. Графики зависимости (1) при $v_n = 20$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 4. Dependence diagrams (1) at $v_n = 20$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

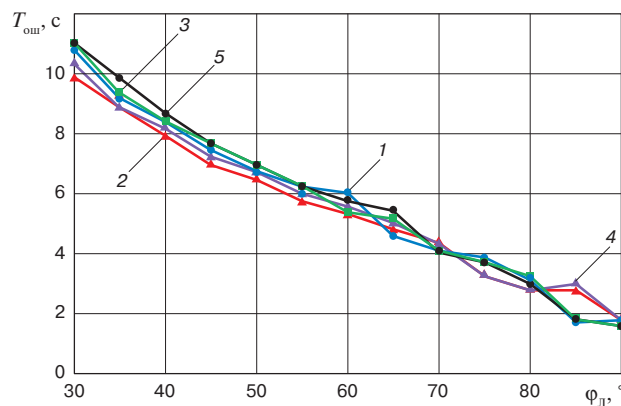


Рис. 5. Графики зависимости (1) при $v_n = 30$ м/с:
1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 5. Dependence diagrams (1) at $v_n = 30$ m/s:
1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

Таблица 1

Выигрыш в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП по результатам первого эксперимента

Table 1

Gain in noise immunity of the investigated receivers in relation to the receiver with linear amplitude detection and non-linear harmonic interference suppression at the end of the first experiment

Скорость поезда v_n , м/с	Выигрыш B в помехоустойчивости приемников			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
2,5	0,60–1,04	0,58–1,04	1,00–1,10	0,98–1,09
5	0,64–1,16	0,63–1,13	1,00–1,14	0,96–1,12
7,5	0,70–1,22	0,70–1,19	0,97–1,14	0,97–1,12
10	0,73–1,24	0,71–1,08	0,87–1,25	0,84–1,08
12,5	0,69–1,25	0,67–1,13	0,95–1,29	0,85–1,10
15	0,71–1,07	0,69–1,07	1,00–1,32	0,94–1,12
17,5	0,76–1,17	0,72–1,14	0,92–1,11	0,92–1,06
20	0,68–1,22	0,64–1,22	0,98–1,20	0,90–1,19
22,5	0,76–1,14	0,76–1,08	0,89–1,32	0,89–1,05
25	0,62–1,16	0,62–1,16	0,95–1,13	0,94–1,04
27,5	0,64–1,21	0,59–1,21	0,89–1,13	0,80–1,13
30	0,61–1,19	0,56–1,19	0,88–1,15	0,84–1,15
32,5	0,57–1,25	0,57–1,25	0,89–1,24	0,89–1,18
35	0,71–1,14	0,57–1,14	0,77–1,20	0,77–1,20
37,5	0,63–1,30	0,63–1,30	0,71–1,18	0,71–1,18
40	0,53–1,29	0,47–1,22	0,89–1,03	0,69–1,03

В табл. 2 представлены значения выигрыша в помехоустойчивости исследованных приемников в сравнении с АДНП для зависимости (2). Наихудшие результаты в таблице выделены желтым цветом, а наилучшие — зеленым.

Анализ результатов. Анализ графиков, представленных на рис. 2, показывает, что помехоустойчивость КПЗ и КППЗ в диапазоне значений ϕ_d от 30 до 70° выше, чем помехоустойчивость АДНП, а в диапазоне значений ϕ_d от 75 до 90° их помехоустойчивость

сопоставима. Добавление в КП блока с зоной нечувствительности в диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ от 30 до 85° значительно снижает $T_{\text{ош}}$, а при $\varphi_{\text{Л}} = 90^\circ$ (при перпендикулярном пересечении) помехоустойчивость КПЗ и КППЗ сравнима с помехоустойчивостью КП, КПП и АДНП. Это объясняется следующим. С уменьшением $\varphi_{\text{Л}}$ значительно увеличивается ЭДС прямого влияния гармонической помехи от ЛЭП, при этом ЭДС косвенного влияния уменьшается незначительно. Как следствие, увеличивается постоянная составляющая огибающей результирующей гармонической помехи на выходе амплитудного детектора (коррелятора) во всех исследованных приемниках. В АДНП влияние этой составляющей снижается за счет применения устройства нелинейного подавления гармонической помехи на выходе амплитудного детектора, в КПЗ и КППЗ — за счет блока с зоной нечувствительности на выходе коррелятора. В КП и КПП влияние этой составляющей не снижается, поскольку в данных приемниках отсутствует устройство подавления гармонической помехи. Поэтому в КП и КПП влияние этой составляющей приводит к увеличению $T_{\text{ош}}$ по сравнению с остальными приемниками.

Помехоустойчивость КПЗ и КППЗ во всем диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ сопоставима с помехоустойчивостью АДНП (рис. 3). Помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП в диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}} = 30 \div 85^\circ$ значительно выше, чем КП и КПП, а при $\varphi_{\text{Л}} = 90^\circ$ их помехоустойчивость сопоставима. Помехоустойчивость всех вариантов КП с БНП практически во всем диапазоне значений $\varphi_{\text{Л}}$ сопоставима с помехоустойчивостью АДНП (рис. 4 и 5).

По рис. 2–4 видно, что графики зависимости $T_{\text{ош}}$ от скорости поезда (1) образуют две группы. В первую группу входят зависимости для КП и КПП, во вторую — для КПЗ, КППЗ и АДНП. С увеличением скорости поезда разница в помехоустойчивости между приемниками, входящими в первую и вторую группы, значительно уменьшается.

В данном эксперименте для всех устройств наименьшее влияние ЛЭП будет оказывать при перпендикулярном пересечении, что согласуется с результатами, полученными в работе Ю.М. Иваненко⁷.

Согласно данным в табл. 1, КП и КПП оказались наихудшими по критерию максимальной помехоустойчивости. Это объясняется тем, что в составе данных приемников отсутствуют устройства подавления гармонической помехи от ЛЭП. Наилучшим является КПЗ, незначительно хуже него — КППЗ. Исходя из этого, добавление в КП блока с зоной нечувствительности позволяет значительно снизить влияние гармонической помехи от ЛЭП, компенсируя

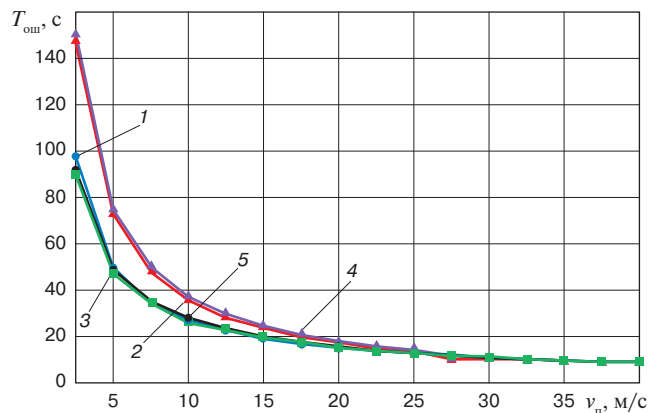


Рис. 6. Графики зависимости (2) при $\varphi_{\text{Л}} = 30^\circ$:

1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 6. Dependence diagrams (2) at $\varphi_{\text{Л}} = 30^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

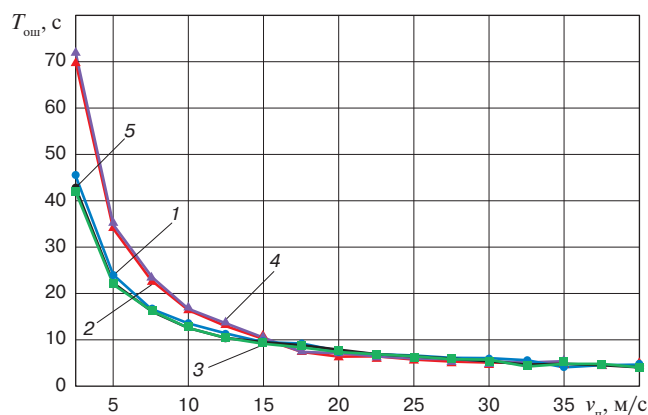


Рис. 7. Графики зависимости (2) при $\varphi_{\text{Л}} = 60^\circ$:

1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗ

Fig. 7. Dependence diagrams (2) at $\varphi_{\text{Л}} = 60^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

снижение помехоустойчивости из-за добавления комбинированного подавителя помех.

Таким образом, по результатам первого эксперимента наиболее предпочтительным по помехоустойчивости является КПЗ, а наименее — КПП.

⁷ Иваненко Ю.М. Исследование влияния линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения на приемные устройства автоматической локомотивной сигнализации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14. Харьков, 1976. 210 с.

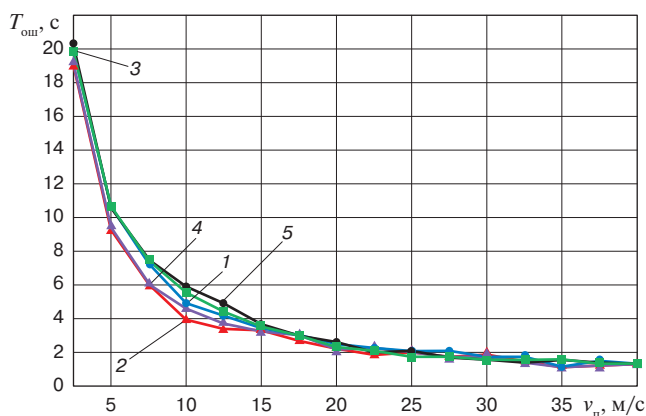
Таблица 2

Выигрыш в помехоустойчивости исследованных приемников относительно АДНП по результатам второго эксперимента

Table 2

Gain in noise immunity of the investigated receivers in relation to the receiver with linear amplitude detection and non-linear harmonic interference suppression at the end of the second experiment

Угол пересечения оси ЛЭП с железнодорожной линией ϕ_d , град.	Выигрыш B в помехоустойчивости приемников			
	КП	КПП	КПЗ	КППЗ
30	0,67–1,11	0,65–1,09	0,97–1,08	0,95–1,06
35	0,66–1,10	0,65–1,10	0,96–1,09	0,94–1,07
40	0,67–1,10	0,65–1,05	0,97–1,09	0,95–1,07
45	0,66–1,12	0,65–1,12	0,96–1,09	0,94–1,07
50	0,66–1,14	0,64–1,11	0,97–1,10	0,95–1,07
55	0,66–1,18	0,64–1,13	1,00–1,10	0,95–1,20
60	0,65–1,20	0,64–1,14	0,84–1,24	0,84–1,18
65	0,65–1,22	0,63–1,22	0,82–1,20	0,78–1,15
70	0,65–1,14	0,63–1,11	0,90–1,14	0,90–1,12
75	0,60–1,20	0,59–1,20	0,96–1,07	0,90–1,12
80	0,60–1,29	0,58–1,22	0,96–1,32	0,89–1,16
85	0,53–0,76	0,47–0,76	0,71–1,20	0,69–1,19
90	1,04–1,30	0,89–1,30	0,87–1,18	0,77–1,18

Рис. 8. Графики зависимости (2) при $\phi_d = 90^\circ$:1 — для АДНП; 2 — для КП; 3 — для КПЗ;
4 — для КПП; 5 — для КППЗFig. 8. Dependence diagrams (2) at $\phi_d = 90^\circ$:

1 — for a receiver with linear amplitude detection and a non-linear harmonic interference suppressor; 2 — for a quadrature receiver without non-linear signal transformation units; 3 — for a quadrature receiver with a deadband unit; 4 — for a quadrature receiver with a combined interference suppressor, which includes an BLN and blanking circuit; 5 — for a quadrature receiver with combined interference suppression and a deadband unit

В диапазоне значений скорости поезда v_n от 2,5 до 20 м/с помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП выше, чем помехоустойчивость КП и КПП, а в диапазоне v_n от 22,5 до 40 м/с их помехоустойчивость сопоставима. Согласно графикам, приведенным на рис. 7,

в диапазоне значений v_n от 2,5 до 12,5 м/с помехоустойчивость КПЗ, КППЗ и АДНП выше, чем помехоустойчивость КП и КПП, а в диапазоне $v_n = 15 \div 40$ м/с они сопоставимы. Представленные на рис. 8 графики показывают, что во всем диапазоне значений v_n помехоустойчивость всех приемников сопоставима. По данным табл. 2 можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным по помехоустойчивости является КПЗ.

Таким образом, во втором эксперименте наибольшей помехоустойчивостью к воздействию гармонической помехи от ЛЭП обладают приемники, в составе которых присутствует блок с зоной нечувствительности (КПЗ, КППЗ) или нелинейное устройство подавления гармонической помехи (АДНП). Наименьшей помехоустойчивостью обладают КП и КПП.

Обсуждение и заключение. По совокупности полученных в результате исследования зависимостей (1) и (2), представленных графиками на рис. 2–8, а также других, полученных, но не представленных в данной работе, можно сделать вывод, что нелинейное преобразование сигнала в приемнике как метод борьбы с помехами от высоковольтных ЛЭП показывает эффект (уменьшение интервала T_{osh} , в течение которого наблюдались ошибки в приеме) на скоростях движения поезда менее 15 м/с и неперпендикулярном пересечении ЛЭП и железнодорожной линии, причем чем меньше скорость, тем больше эффект. При перпендикулярном

пересечении воздействие гармонической помехи от ЛЭП на приемники минимально, и эффект от нелинейного преобразования практически отсутствует. Это согласуется с наблюдаемым на практике эффектом снижения количества сбоев в работе АЛСН при переустройстве ЛЭП и организации ее перпендикулярного пересечения с железнодорожной линией.

Результаты исследования будут учтены при создании лабораторного макета квадратурного приемника с нелинейным преобразованием сигналов АЛСН и оценки его помехоустойчивости в лабораторных условиях. Практическое внедрение квадратурного приемника возможно в рамках НИОКР по модернизации существующих локомотивных устройств безопасности либо при разработке новых.

Дальнейшие исследования авторов направлены на определение наиболее помехоустойчивого и безопасного приемника сигналов АЛСН с учетом исследованных приемников и различных мешающих воздействий (импульсных, гармонических и флуктуационных помех) и последующую реализацию такого приемника в виде лабораторного макета. Также представляет практический интерес исследование помехоустойчивости и безопасности приемника в лабораторных условиях с использованием записей сигналов и помех, зарегистрированных в реальных поездках на локомотивах грузовых поездов.

Проведенное исследование показало, что среди всех рассмотренных типов приемников по помехоустойчивости при воздействии гармонической помехи от ЛЭП наиболее предпочтительным оказался квадратурный приемник с блоком с зоной нечувствительности. Незначительно уступают ему приемник с комбинированным подавителем помех и блоком с зоной нечувствительности и приемник с амплитудным детектированием и нелинейным устройством подавления гармонической помехи. Наихудшую помехоустойчивость показал приемник с комбинированным подавителем помех. Поэтому для борьбы с гармонической помехой от ЛЭП в канале АЛСН целесообразно применение приемников, в составе которых присутствует блок с зоной нечувствительности.

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.

Finding: 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. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 4. С. 14–19 [Shamanov V. I. Security of locomotive receivers automatic locomotive signaling from interference. *Automation, communication, informatics*. 2013;(4):14-19. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/qirkcl>.
2. Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К. Комплексные локомотивные системы безопасности // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 10. С. 2–4 [Rozenberg E. N., Shukhina E. E., Kiselgof G. K. Comprehensive locomotive safety systems. *Automation, communication, informatics*. 2014;(10):2-4. (In Russ.)] EDN: <https://www.elibrary.ru/snqsdv>.
3. Шухина Е. Е., Висков В. В., Гурьянов А. В. Безопасный локомотивный объединенный комплекс БЛОК // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 4. С. 18–19 [Shukhina E. E., Viskov V. V., Gur'yanov A. V. BLOK safe integrated locomotive unit. *Automation, communication, informatics*. 2011;(4):18-19. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/nwhahf>.
4. Гурьянов А. В., Сулоев А. В. Микропроцессорный дешифратор ДКСВ-М // Труды АО «НИИАС». М.: Т 8 Издательские Технологии, 2021. Т. 1, вып. 11. С. 278–282 [Gur'yanov A. V., Suloev A. V. DKSV-M microprocessor decoder. In: *Proceedings of the NIIS*. Moscow: Vol. 8 Izdatel'skie Tehnologii; 2021. Vol. 1, Issue 11. p. 278–282. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/boqcqa>.
5. Кравцов Ю. А., Чегуров А. Б. Корреляционный способ дешифрирования числовых кодовых сигналов АЛСН // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (Вестник РГУПС). 2009. № 2 (34). С. 34–39 [Kravtsov Yu. A., Chegurov A. B. Correlation method of cab signaling code identification. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2009;(2):34-39. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/kzmmgt>.
6. Оценка эффективности локомотивного цифрового фильтра АЛСН при помощи полунатурных измерений / М. Э. Скоробогатов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (81). С. 62–69 [Skorobogatov M. E., Pulyakov A. V., Demyanov V. V., Alekseenko V. A. Estimation efficiency of the ALSN locomotive digital filter using semi-in-line measurements. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2021;(1):62-69. (In Russ.)]. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_62.
7. Засов В. А. Компенсация помех в приемниках сигналов автоматической локомотивной сигнализации // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5, № 1. С. 32–44 [Zasov V. A. Compensation of noise in signal receivers automatic locomotive signaling. *Transport Automation Research*. 2019;5(1):32-44. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rliuxo>. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-1-32-44>.
8. Засов В. А., Ромкин М. В. Адаптивное подавление мощных коррелированных помех в прерывистых сигналах // Вестник СамГУПС. 2022. № 1 (55). С. 76–83 [Zasov V. A., Romkin M. V. Adaptive suppression of strong correlated interference in intermittent signals. *Vestnik SamGUPS*. 2022;(1):76-83. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/dolbst>.
9. Юсупов Р. Р., Хохрин А. С. Корреляционный приемник с квадратурными каналами для автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа АЛСН // Транспорт Урала. 2022. № 3 (74). С. 49–54 [Yusupov R. R., Khokhrin A. S. Correlation receiver

with quadrature channels for continuously working automatic cab signaling. *Transport of the Urals*. 2022;(3):49-54. (In Russ.)). <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-3-49-54>.

10. Влияние гармонических помех от высоковольтных ЛЭП на помехоустойчивость приемника канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия / Р. Р. Юсупов [и др.] // Электротехника. 2023. № 10. С. 35–38 [Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Gordeev I. P., Blachev K. E. The influence of harmonic interference from high-voltage power lines on the noise immunity of the receiver of the continuous automatic locomotive signaling channel. *Russian Electrical Engineering*. 2023;(10):35-38. (In Russ.)). EDN: <https://elibrary.ru/reihms>. https://doi.org/10.53891/00135860_2023_10_35.

11. Хохрин А. С., Юсупов Р. Р., Плохов Е. М. Об эффективности корреляционного приема и нелинейной обработки в приемнике сигналов АЛСН // Электротехника. 2023. № 10. С. 50–54 [Khokhrin A. S., Yusupov R. R., Plokhov E. M. On the effectiveness of correlation reception and nonlinear processing in the receiver of CAALS signals. *Russian Electrical Engineering*. 2023;(10):50-54. (In Russ.)). EDN: <https://elibrary.ru/jllhyc>. https://doi.org/10.53891/00135860_2023_10_50.

12. Юсупов Р. Р., Леушин В. Б., Блacheв К. Э. Нелинейная обработка как способ борьбы с влиянием высоковольтных ЛЭП на работу локомотивного цифрового приемника канала АЛСН // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития. 2007. № 2007. С. 55–59 [Yusupov R. R., Leushin V. B., Blachev K. E. Non-linear processing as a way to counteract high-voltage power line interference with the locomotive digital receiver of CACS channel. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Spetsial'nyy vypusk: Problemy zhelezнодорожного транспорта na sovremennom etape razvitiya*. 2007;(2007):55-59. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/wijdyx>.

13. Сороко В. И., Фоткина Ж. В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справ.: в 5 кн. Кн. 4. 5-е изд. М.: Планета, 2020. 1020 с. [Soroko V. I., Fot'kina J. V. *Railway automation and telemechanics hardware: reference book: 5 books. Book 4*. 5th ed. Moscow: Planeta Publ.; 2020. 1020 p. (In Russ.)).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Руслан Рифович ЮСУПОВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы 2В), Author ID: 191442, <https://orcid.org/0000-0002-7572-3102>

Алексей Сергеевич ХОХРИН,

аспирант, преподаватель, кафедра автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте, Самарский

государственный университет путей сообщения (СамГУПС, 443066, г. Самара, ул. Свободы 2В), Author ID: 1107392, <https://orcid.org/0000-0003-3113-8769>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan R. YUSUPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 191442, <https://orcid.org/0000-0002-7572-3102>

Alexey S. KHOKHRIN,

Postgraduate, Lecturer, Automation, Telemechanics and Communication in Railway Transport Department, Samara State Transport University (443066, Samara, 2V, Svobody St.), Author ID: 1107392, <https://orcid.org/0000-0003-3113-8769>

ВКЛАД АВТОРОВ

Руслан Рифович ЮСУПОВ. Постановка цели и задач исследования, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Алексей Сергеевич ХОХРИН. Разработка методики проведения экспериментов, их проведение и обработка результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ruslan R. YUSUPOV. Setting goals and objectives of the research, editing and preparation of the text of the manuscript (50%).

Alexey S. KHOKHRIN. Development of methods of conducting experiments, their implementation and processing of results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023, рецензия от первого рецензента получена 26.11.2023, рецензия от второго рецензента получена 04.12.2023, принята к публикации 26.01.2024.

The article was submitted 26.10.2023, first review received 26.11.2023, second review received 04.12.2023, accepted for publication 26.01.2024.

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».

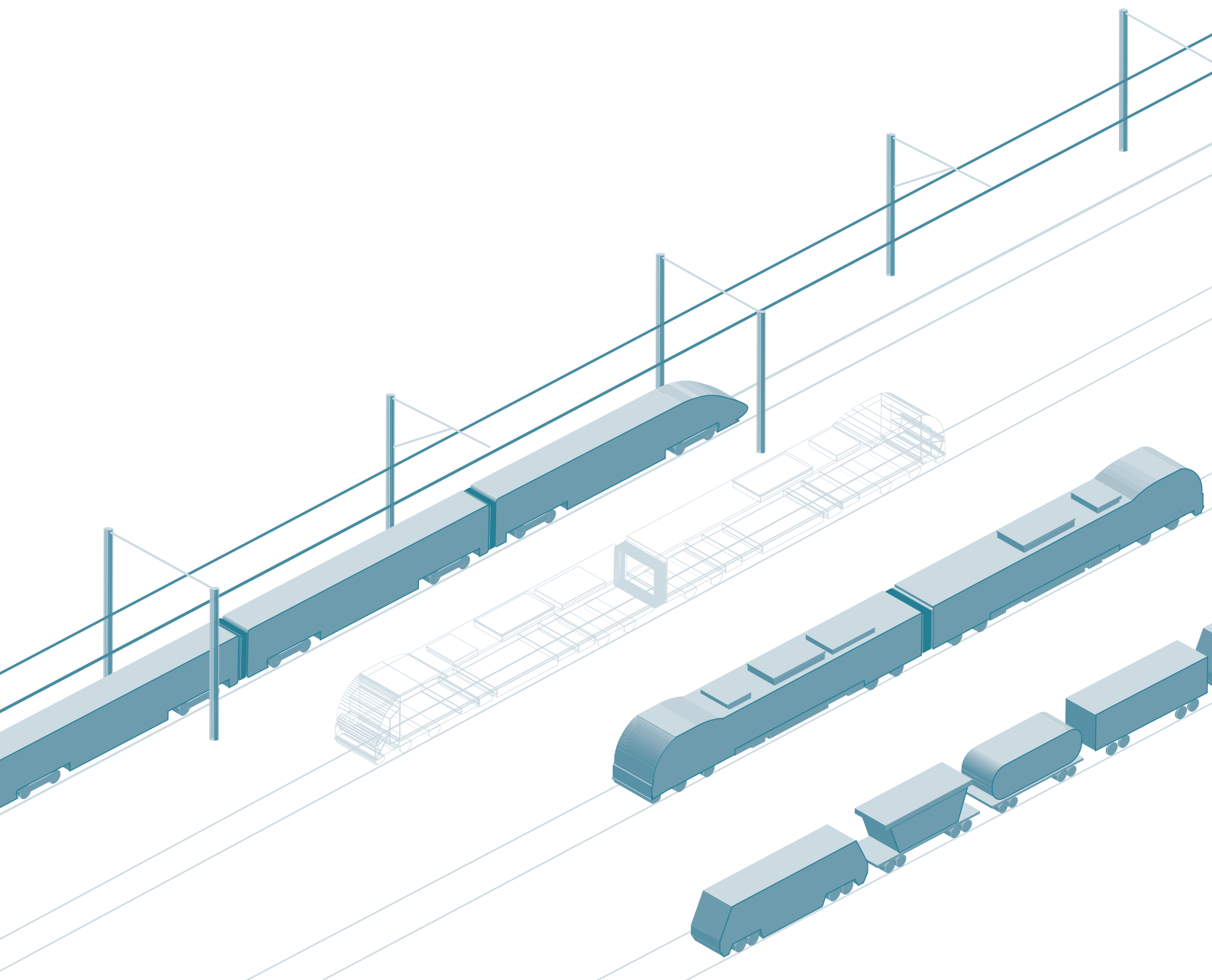
Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

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.

ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

TRANSPORT MATERIALS SCIENCE





ТРАНСПОРТНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Оригинальная статья

УДК 629.4.027.115

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



Корпус буксы грузового вагона из алюминиевого сплава: опыт разработки, производства и эксплуатационных испытаний (1958–1993 гг.) и современные перспективы

А. В. Лапа¹, И. С. Гершман²✉, С. В. Новиков^{3,4}

¹ Объединенная компания РУСАЛ Торговый дом,
Москва, Российская Федерация

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

³ Международная академия транспорта,
Москва, Российская Федерация

⁴ РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»,
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время актуально использование свойств алюминиевых сплавов для решения проблем грузоподъемности вагонов. Узлы грузового вагона из алюминиевых сплавов примерно в три раза легче стальных, что позволяет при сохранении заданной нагрузки на ось перевозить больше грузов тем же количеством вагонов. Начало применения алюминия в качестве конструкционного материала для изготовления корпусов буксовых узлов положено Уральским вагоностроительным заводом еще в 1950-х гг.

Материалы и методы. Выполнен обзор исследований по изготовлению корпусов букс колесных пар грузовых вагонов из алюминиевых сплавов в нашей стране и за рубежом. Изучены технологии производства алюминиевого корпуса буксы, а также результаты стендовых и эксплуатационных испытаний.

Результаты. Анализ технологий производства корпусов букс из алюминиевых сплавов и результатов эксплуатационных испытаний опытной партии букс позволил получить перечень положительных и отрицательных сторон данной конструкции, а также сделать вывод о целесообразности ее применения.

Обсуждение и заключение. Предлагается возобновить работы по применению алюминиевых сплавов для изготовления корпусов букс грузовых вагонов с учетом современных условий эксплуатации. В целях подтверждения технико-экономической эффективности следует провести комплекс стендовых и эксплуатационных испытаний с применением современных диагностических комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузовые вагоны, корпус буксы, алюминиевые сплавы, распределение нагрузки на тела качения, механические свойства, стендовые испытания, эксплуатационные испытания

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лапа А. В., Гершман И. С., Новиков С. В. Корпус буксы грузового вагона из алюминиевого сплава: опыт разработки, производства и эксплуатационных испытаний (1958–1993 гг.) и современные перспективы // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 1. С. 82–90.

✉ gershman.iosif@vniizht.ru (И. С. Гершман)

© Лапа А. В., Гершман И. С., Новиков С. В., 2024

Original article

UDK 629.4.027.115

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



Aluminium alloy wagon axle box: experience of development, production and operational tests (1958–1993) and modern prospects

Alexander V. Lapa¹, Iosif S. Gershman²✉, Sergey V. Novikov^{3,4}

¹ United Company RUSAL Trading House,
Moscow, Russian Federation

² Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

³ International Transport Academy,
Moscow, Russian Federation

⁴ TECHNOSPHERA Advertising and Publishing,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Solutions to car weight-bearing capacity problems currently tend to benefit from the properties of aluminium alloys. Aluminium alloy wagon units are about three times lighter than steel ones, which helps to carry more freight with the same number of cars while maintaining the specified axle load. The Ural Wagon Factory was the first to use aluminium as a structural material for the manufacture of axle box mount in the 1950s.

Materials and methods. This paper reviews the research on the production of wagon wheel pair axle boxes from aluminium alloys in Russia and abroad. It examines the manufacturing techniques of the aluminium axle box and the results of bench and operational tests.

Results. The analysis of production technologies of aluminium alloy axle boxes and the results of operational tests of the pilot batch of axle boxes revealed the advantages and disadvantages of this design and led to the conclusions about its feasibility.

Discussion and conclusion. The authors propose to resume the use of aluminium alloys in wagon axle boxes considering modern operating conditions. Confirmation of its technical and economic efficiency requires a set of bench and operational tests with the use of modern diagnostic tools.

KEYWORDS: wagons, axle box, aluminium alloys, distribution of load on rolling bodies, mechanical properties, bench tests, operational tests

FOR CITATION: Lapa A. V., Gershman I. S., Novikov S. V. Aluminium alloy wagon axle box: experience of development, production and operational tests (1958–1993) and modern prospects. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(1):82-90. (In Russ.).

Введение. В Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года¹ предусмотрены мероприятия по увеличению пропускной способности имеющейся железнодорожной инфраструктуры и строительству новых железнодорожных путей. Однако перевозочная мощность железных дорог обуславливается не только пропускной способностью инфраструктуры, но и техническими параметрами вагонного парка и весом грузовых поездов нетто [1].

На протяжении всей истории железнодорожных перевозок с развитием тяги и возможностей инфраструктуры происходит увеличение массы и составности грузовых поездов. Если ответственность за увеличение массы поезда в большей степени лежит на железнодорожной инфраструктуре и тяговых возможностях локомотивов, то сохранение длины поезда в разумных пределах определяется степенью развития вагонного парка. Для сохранения длины поезда, при которой существующая инфраструктура железнодорожных станций позволит осуществлять прием, отправку и обработку тяжеловесных поездов, требуется увеличивать грузоподъемность вагонов. Грузоподъемность вагонов характеризуется и ограничивается в первую очередь максимально допустимой нагрузкой на ось — массой тары вагона и перевозимого груза, приходящейся на каждую колесную пару вагона. Существующая инфраструктура российских железных дорог позволяет эксплуатировать вагоны с нагрузкой на ось 228–245 кН (23,5–25 тс) [1].

В настоящее время наиболее распространенной грузовой тележкой на железнодорожном пространстве 1520 является трехэлементная тележка модели 18-100 (ЦНИИ-ХЗ), разработанная в 30-е гг. XX в. инженером А. Г. Ханиным. В разные годы нагрузка на ось и максимально допустимая скорость тележки менялись и достигали 25 тс и 120 км/ч соответственно, но в настоящее время тележка характеризуется нагрузкой на ось в 23 тс и максимальной скоростью в 120 км/ч.

В погоне за грузоподъемностью, надежностью и максимальной конструкционной скоростью конструкторы и производители вагонов разрабатывают новые типы тележек и буксовых узлов колесных пар [2]. При проектировании буксовых узлов все больше внимания уделяется кассетным подшипникам. Отличием кассетных подшипников от обычных роликовых подшипников является компактность, возможность восприятия повышенных ударных нагрузок, а также увеличение эксплуатационной надежности и гарантийного срока [3–6]. При этом в качестве элемента,

передающего нагрузку на подшипник колесной пары, используется стальной адаптер (полубукса).

В целях выполнения задач, поставленных Правительством России по увеличению пропускной и провозной способности железных дорог, стоит принять во внимание альтернативные подходы к увеличению нагрузки на ось колесной пары вагона с учетом одновременного увеличения номинального ресурса подшипников, снижения воздействия на путь и повышения износостойкости колесных пар. Для решения проблем грузоподъемности вагонов могут применяться алюминиевые сплавы: алюминий в три раза легче стали, поэтому можно перевозить больший объем грузов при неизменном количестве вагонов и неизменной нагрузке на ось. Как правило, из алюминия изготавливается кузов вагона. Логичным продолжением данной тенденции является замена стальных деталей тележки на алюминиевые. В СССР был накоплен опыт применения алюминиевых сплавов для изготовления корпусов букс для грузовых вагонов².

Настоящая статья посвящена обзору исследований по изготовлению корпусов букс из алюминиевых сплавов грузовых вагонов и оценке перспектив возобновления работ по данному направлению в современных условиях эксплуатации.

История разработки. Применение алюминиевых сплавов для изготовления корпусов букс грузовых вагонов было начато еще в 1958 г. Инициаторами работ по созданию алюминиевых корпусов букс грузовых вагонов стали специалисты отдела главного конструктора Уралвагонзавода [7]. Первые образцы корпусов букс из алюминиевых сплавов были изготовлены в 1960 г. Первоначально была выбрана технология литья в землю, материалом был выбран алюминиевый сплав АЛ-9 [8, 9]. Опытная партия корпусов букс составила 11 шт., конструкция экспериментальных корпусов полностью повторяла конструкцию стального корпуса буксы, что обеспечивало их взаимозаменяемость. При проведении эксплуатационных испытаний у части экспериментальных корпусов букс произошли изломы направляющих челюстей либо были выявлены трещины в месте сопряжения направляющей челюсти с корпусом со стороны лабиринта. Анализ показал, что причиной изломов являлось наличие литейных дефектов. При этом часть корпусов успешно наработали 763 тыс. км, и их состояние оставалось удовлетворительным. По результатам научно-исследовательских работ, выполненных ВНИИЖТ, первый опыт эксплуатации корпусов

¹ Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. URL <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730950.pdf> (дата обращения: 02.07.2023).

² Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов: справ. рук-во. М.: Металлургия, 1971. 352 с.; Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы: справ. рук-во. М.: Металлургия, 1972. 552 с.

буксовых узлов из алюминиевого сплава был признан положительным.

Зарубежный опыт. За рубежом накоплен опыт использования алюминиевых сплавов для корпусов букс, однако, так как все преимущества сводятся к облегчению массы, основное применение они находят в вагонах метрополитенов, пригородных и скоростных пассажирских поездах — изготавливаются кузова вагонов и его детали, корпуса редукторов, корпуса букс [10]. Компания A&M Manufacturing Co Ltd (Китай) производит буксы из алюминиевого сплава 7050 для высокоскоростных поездов³. Опыт применения алюминиевых сплавов для корпусов букс грузовых вагонов очень незначителен. Причина этого, по-видимому, связана с несущественным снижением массы грузового вагона [11]. Другие преимущества применения алюминиевых корпусов букс для грузовых вагонов не рассматривались.

Результаты эксплуатационных испытаний. В 60-е гг. прошлого столетия Уралвагонзавод совместно с ВНИИЖТ, Днепропетровским институтом инженеров железнодорожного транспорта (ДИИТ) и Каменск-Уральским металлургическим заводом (КУМЗ) разработали, изготовили и провели эксплуатационные испытания корпусов букс из механически обработанных фасонных труб. Фасонная труба была изготовлена методом экструзии из сплава АМг6 и имела обозначение ТФ-2⁴. По форме она имела наружные очертания корпуса буксы, а внутренний диаметр был с припуском на механическую обработку [12, 13].

Первое опытное прессование было проведено в 1966 г. В 1968 г. была изготовлена первая опытная партия алюминиевых букс и были начаты стендовые и эксплуатационные испытания. В 1971 и 1973 гг. конструкция корпуса была доработана. Образцы трубы ТФ-2, мерная заготовка из трубы и корпус буксы приведены на рис. 1, 2, 3 соответственно.

Испытания проводились вплоть до 1980 г. За весь период (12 лет) эксплуатационных испытаний общая наработка опытных букс составила 930 тыс. км, алюминиевые корпуса букс и работающие с ними подшипники не потребовали ни одной внеплановой замены, что оказало положительное влияние на безопасность движения поездов [14].

Корпуса букс, получаемые из алюминиевого сплава методом прессования, в 1984 г. были рекомендованы межведомственной приемочной комиссией и поставлены на серийное производство. В эксплуатации к тому времени находилось около 5 тыс. алюминиевых корпусов. Массовое производство корпусов букс из

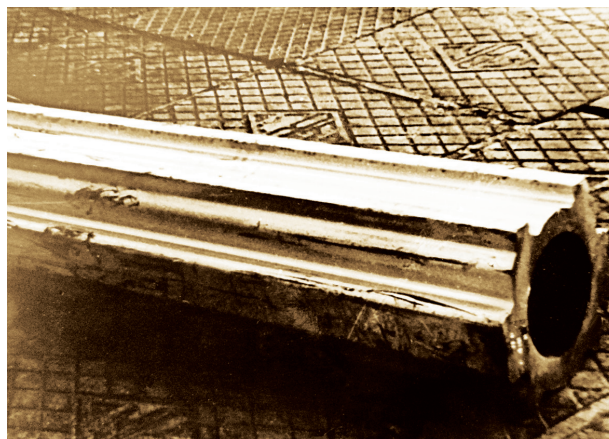


Рис. 1. Труба ТФ-2

Fig. 1. TF-2 pipe



Рис. 2. Мерная заготовка из трубы ТФ-2 для корпуса буксы

Fig. 2. Measuring billet from TF-2 pipe for axle box

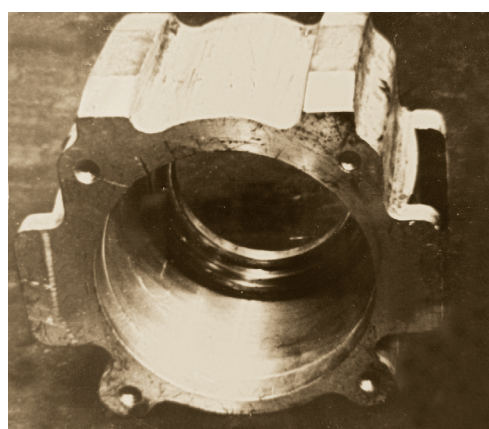


Рис. 3. Корпус буксы из трубы после механической обработки

Fig. 3. Axle box made of pipe after mechanical treatment

³ Aluminum alloy axle box. URL: <https://www.am-casting.com/railway-accessories/57274229.html> (дата обращения: 26.10.2023).

⁴ А. с. №1585195 СССР, МПК В61F 15/12(2006.01). Корпус буксы из алюминиевого сплава: №4383308: заявл. 09.12.1987: опубл. 15.08.1990 /Новиков В. В., Двухглавов В. А., Ткачук З. Г. [и др.]. 2 с.



Рис. 4. Штампованная заготовка для корпуса буксы

Fig. 4. Stamped billet for axle box

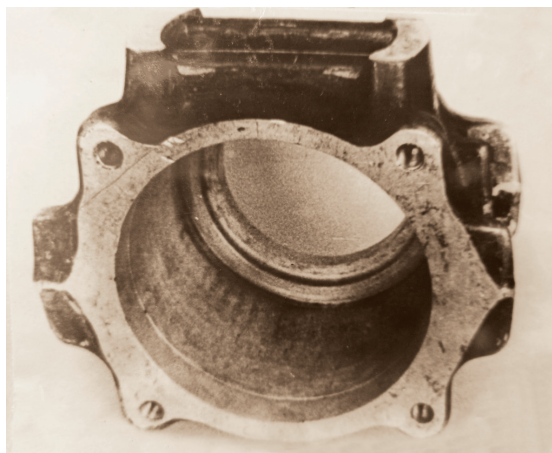


Рис. 5. Корпус из штампованной заготовки после механической обработки

Fig. 5. Axle box made of stamped billet after mechanical treatment

профильной трубы ТФ-2 было организовано на Люблинском литейно-механическом и Уфимском тепловозоремонтном заводах.

Алюминиевые корпуса букс по отношению к стальным имеют недостаток, выражающийся в более интенсивном износе контактных поверхностей с буксовым проемом тележки, что негативно сказывалось на сроке службы корпусов. Интенсивность износа достигала в среднем около 1 мм на каждые 100 тыс. км пробега вагона [15–17]. Для решения данной проблемы предложен симметричный

в горизонтальной плоскости корпус буксы [18]. При износе контактных поверхностей буксы без проведения демонтажа поворачивалась на 180 градусов вокруг оси вращения, в результате чего эксплуатация буксы могла быть продолжена. На данное техническое решение было получено авторское свидетельство на изобретение⁵. В феврале 1990 г. предложенная конструкция корпуса буксы внедрена в серийное производство. Заготовкой для изготовления данных корпусов служила фасонная труба ТФ-5 из сплава АМгб.

В 1989 г. группой специалистов ВНИИЖТ, Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ), Люблинского литейно-механического завода, КУМЗ и Уралвагонзавода была разработана технология производства корпусов букс по чертежу 100.10.009-3 из штампованной алюминиевой заготовки УВ-37⁶. На рис. 4 и 5 приведены штампованная заготовка и корпус буксы, изготовленный из нее, соответственно.

Комплекс проводимых исследований показал, что выбранная конструкция корпуса из сплава АМгб обладает достаточным запасом прочности как при статическом, так и циклическом приложении нагрузки. Были проведены сравнительные испытания корпусов букс из прессованной трубы (к испытаниям были приняты корпуса, изготовленные из труб, поставленных Самарским металлургическим производственным объединением) и штампованных заготовок без отжига и с отжигом (поставленные КУМЗ). Результаты испытаний показали, что прочность направляющих челюстей у корпусов букс из штампованной заготовки выше, чем у букс из прессованной трубы, хотя материал букс в обоих случаях один и тот же — алюминиевый сплав АМгб [19, 20].

В 1990 г. Красноярский металлургический завод (КраМЗ) предложил МПС свой вариант штампованных заготовок (чертеж Б-1М) для изготовления корпуса буксы из алюминиевого сплава АМгб по чертежу 100.10.009-3 (рис. 6).

В период 1992–1993 гг. силами ВНИИЖТ была выполнена программа стендовых испытаний. Результаты испытаний показали, что корпуса букс, изготовленные из штамповок КраМЗ, по прочностным характеристикам соответствуют корпусам, изготовленным из штамповок КУМЗ, и превосходят корпуса, получаемые из прессованных фасонных труб. Результаты испытаний нагруженности подшипников показали, что при нагрузке в 235 кН (23,5 тс) корпуса букс

⁵ А. с. № 1306782 СССР, МПК В61F 15/12 (2006.01). Корпус буксы из алюминиевого сплава для железнодорожного подвижного состава: № 2016137520: заявл. 19.04.1985; опубл. 30.04.1987 / Буше Н. А., Савчук О. М., Девяткин В. П. [и др.]. 4 с.

⁶ А. с. № 568493 СССР, МПК В21J 5/00(2006.01). Заготовка для получения корпуса буксы железнодорожных вагонов методом горячей штамповки: № 1870556: заявл. 12.01.1973; опубл. 15.08.1977 / Кузько Ю. П., Копыский Б. Д., Залбштейн А. О. [и др.]. 2 с.

находятся на рекомендованном уровне технологической и конструктивной проработки для серийного производства, а при испытаниях под нагрузкой в 300 кН для перспективных условий эксплуатации с повышенными нагрузками на ось корпус буксы обеспечивает более благоприятные условия для нагрузки подшипников, что позволит в эксплуатации иметь повышенную их долговечность (более чем на 30%) за счет уменьшения браковки по усталостным повреждениям [21–24].

В работе Д. Б. Грица [25] рассмотрен вопрос распределения нагрузки по телам качения. В частности, утверждается, что для корпусов буксовых узлов, выполненных по чертежу 100.10.009-0 (и аналогичных), ролики, находящиеся под действием радиальной нагрузки (в центре), являются недогруженными в сравнении со смежными с ними, а наиболее нагруженный ролик смещен от вертикали под углом α или 2α . В рассматриваемом случае на угол $\alpha = 25^\circ 42'$ от вертикальной оси смещена наиболее нагруженная точка. Нагрузка, приходящаяся на находящийся в этом месте ролик, в сравнении с расчетной для переднего подшипника меньше на 12–16%, для заднего — на 13–15%. Зависимость номинального ресурса подшипника от воспринимаемой им эквивалентной динамической нагрузки обратно пропорциональная: чем больше нагрузка, тем меньше ресурс [6, 26, 27].

Более оптимальное распределение нагрузки на тела качения буксовых подшипников достигается при использовании корпусов букс из алюминиевого сплава, что описано в работах [7, 28, 29, 30].

В работе [16] описаны сравнительные динамические испытания четырехосных полувагонов на тележках ЦНИИ-Х3-О, оборудованных корпусами букс из алюминиевого сплава АМг6 (метод изготовления — из прессованной трубы ТФ-2) и стальными стандартными корпусами букс. Во время испытаний при нагрузках на ось 23,25 т и скоростях движения от 50 до 120 км/ч регистрировались силы взаимодействия вагонов и пути, динамические ускорения корпусов букс и кузова, усилия в ходовых частях вагона. Чтобы исключить влияние на результаты испытаний побочных факторов, опытные поездки проводились в два этапа: сначала на тележки были установлены стальные корпуса букс, а затем буксы из алюминиевого сплава. Параметры вагонов и пути оставались практически без изменений.

Анализ результатов испытаний показал, что применение корпусов букс из алюминиевых сплавов положительно сказывается на взаимодействии вагона и пути. Уровень вертикального воздействия на путь характеризуется, как известно, величиной статической нагрузки на ось и знакопеременными добавками к ней, вызываемыми колебаниями вагона и оцениваемыми средними квадратичными отклонениями сил и прогибов рельсов от их средних значений. При проследовании вагона



Рис. 6. Корпус буксы из штампованной заготовки КраМЗ. Слева — вид передней стороны, справа — вид со стороны лабиринта

Fig. 6. Axle box made of stamped billets by the Krasnoyarsk Metallurgical Plant. Left — front view, right — labyrinth side view

с алюминиевыми корпусами букс эти отклонения оказывались на 10–15% ниже, чем при движении вагона, оборудованного стальными корпусами. Соответственно, наибольшие вероятностные значения вертикальных сил и прогибов рельсов в диапазоне скоростей от 50 до 100 км/ч у таких вагонов оказались на 9–12% ниже, чем у вагонов со стальными корпусами. Обработка записей сил взаимодействия, зарегистрированных на вагоне (в колесах динамометрической колесной пары), позволила подтвердить результаты измерений в пути.

Вертикальные ускорения буксовых узлов и коррелирующие с ними коэффициенты динамики неподдрессоренных масс вагона (определенные по усилиям в боковых рамах тележек) уменьшились при установке алюминиевых корпусов по средним значениям на 12–15%, по максимальным вероятностным — на 9–10%. Снизились также на 15% вертикальные ускорения кузова полувагона вблизи пятниковых узлов. Анализ спектральных плотностей динамических процессов в вагонах со стальными и алюминиевыми корпусами букс показал, что последние весьма эффективно погашают высокочастотные вибрации, что способствует уменьшению амплитуды колебаний.

В целом по результатам испытаний сделан вывод, что корпуса букс из алюминиевых сплавов обеспечивают снижение динамических сил и ускорений на тележках ЦНИИ-Х3-О, а также воздействие их на путь не менее чем на 9% [22, 31].

Результаты комплексных исследований и испытаний подтвердили высокую техническую эффективность корпусов букс из алюминиевого сплава АМг6. Благодаря им достигается уменьшение уровня динамических сил взаимодействия вагона и пути, что особенно важно в связи с увеличением нагрузки на ось, а также повышением долговечности работы подшипников.

Выявленное при динамических испытаниях снижение динамических сил взаимодействия вагона и пути должно снизить интенсивность износа элементов пути и поверхности катания колеса, а также способствовать увеличению технической скорости вагонов. На опытных маршрутах Кривой Рог — Ужгород и Экибастуз — Омск были измерены в начальный период прокаты колес с алюминиевыми корпусами букс, затем периодически проводились повторные измерения. Также в маршрут Кривой Рог — Ужгород были включены первые вагоны со стальными корпусами букс, у которых тоже проводили измерения проката колес для сравнения [32].

Статистическая обработка данных измерений, выполненная в ДИИТе, показала, что за полтора года испытаний (115 тыс. км пробега) средний пробег на 1 мм проката для колесных пар с алюминиевыми корпусами букс составил 76 тыс. км, а со стальными — 70 тыс. км, т. е. на 10 % выше. Это подтверждает данные динамических испытаний о положительном влиянии алюминиевых корпусов на уменьшение динамических сил. Полученные на маршрутах Экибастуз — Омск данные по износам колес и гребней показали преимущества алюминиевых корпусов букс. Средний за два года пробег на 1 мм проката составил 100 тыс. км, что было значительно выше среднесетевого уровня [7].

В 1991 г. заказы на алюминиевые корпуса резко снизились, а затем совсем прекратились в связи с тем, что стоимость их была выше, чем стальных [18]. Второй причиной (а по мнению экспертов — главной), по которой корпуса букс из алюминиевых сплавов не получили развития и в настоящее время не применяются, явилось их хищение из-под вагонов, находящихся в составе поездов, что приводило к значительному простоя поездов в ожидании восстановительного ремонта, а также убыткам грузоотправителей, операторов железнодорожных перевозок и грузополучателей. Однако статистических данных по данной проблеме в доступных источниках обнаружить не удалось.

Обсуждение и заключение. В СССР промышленное применение алюминия строго ранжировалось, и алюминий использовался исключительно в оборонной промышленности и авиастроении. Поэтому для нужд МПС были выделены фонды только на алюминиевый сплав марки АМгб. В настоящее время таких ограничений нет, в связи с чем представляется целесообразным провести НИР по выбору наиболее отвечающего запросам оптимального алюминиевого сплава для изготовления корпусов букс грузовых вагонов с учетом современных условий эксплуатации.

Исходя из того, что применение алюминиевых корпусов букс позволяет снизить динамическое воздействие на путь, предлагается провести исследования по влиянию алюминиевого корпуса буксы на боковой

износ колес и рельсов. Данные исследования особенно актуальны для кривых малых радиусов.

Анализ литературных источников, в которых рассматривались различные технологии изготовления корпусов алюминиевых букс, показал, что перспективным методом их изготовления является штамповка.

В связи с внедрением кассетных подшипников перспективно рассмотреть возможность изготовления адаптера из алюминиевого сплава, что может позволить увеличить долговечность подшипника. При этом необходимо провести исследования теплового режима кассетного подшипника. Так как теплопроводность алюминия в пять раз больше, чем у стали, то можно ожидать снижения рабочей температуры кассетного подшипника в процессе эксплуатации.

О надежности корпусов букс говорит тот факт, что за период 12-летних эксплуатационных испытаний (общий пробег 930 тыс. км) алюминиевые корпуса букс и работающие с ними подшипники не имели ни одного внезапного отказа и полностью обеспечили безопасность движения поездов.

Представленный анализ показывает, что работы по применению алюминиевых сплавов для изготовления корпусов букс грузовых вагонов целесообразно возобновить.

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. Аль-Шумари А. С., Котенко О. В. Влияние веса и скорости грузовых поездов на провозную способность однопутных линий большой грузонапряженности // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 1 (26). С. 27–35 [Al-Shumary A. S., Kotenko O. V. Influence of freight train weight and speed on carrying capacity of single-track lines having great traffic density. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2011;(1):27-35. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ntzcaf>.
2. Бороненко Ю. П., Орлова А. М. Тележки с повышенной осевой нагрузкой // Железнодорожный транспорт. 2008. № 10. С. 50–54 [Boronenko Yu. P., Orlova A. M. Increased axial load bogies. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2008;(10):50-54. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/julgit>.
3. Подшипники качения: справ.-каталог / под ред. В. Н. Нарышкина, Р. В. Коросташевского. М.: Машиностроение, 1984. 280 с. [Naryshkin V. N., Korostashevskiy R. V. (eds.) *Roller bearings: a reference catalogue*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1984. 280 c. (In Russ.)].
4. Савчук О. М. Влияние упругости корпуса буксы на работу подшипников // Динамика механических систем. Киев: Наукова думка, 1983. С. 139–149 [Savchuk O. M. Influence of axle housing elasticity on bearing performance. In: *Dynamics of mechanical systems*. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1983. p. 139–149. (In Russ.)].

5. Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н. Сплавы с высокими демпфирующими свойствами. М.: Металлургия, 1973. 255 с. [Favstov Yu. K., Shulga Yu. N. *Alloys with high damping properties*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1973. 255 p. (In Russ.)].
6. Цюренко В. Н., Петров В. А. Надежность роликовых подшипников в буксах вагонов. М.: Транспорт, 1982. 96 с. [Tsyurenko V. N., Petrov V. A. *Reliability of roller bearings in carriage axleboxes*. Moscow: Transport Publ.; 1982. 96 p. (In Russ.)].
7. Абашкин В. В. Результаты контрольных испытаний работоспособности роликовых подшипников в буксах с упругими элементами // Повышение надежности и долговечности роликовых подшипников в буксах вагонов. М.: Транспорт, 1978. С. 102–112. (Труды ЦНИИ МПС; вып. 583) [Abashkin V. V. Results of verification tests of roller bearings in axleboxes with elastic elements. In: *Increasing roller bearing reliability and durability in car axleboxes*. Moscow: Transport Publ.; 1978. p. 102–112. (Proceedings of TsNII MPS; Issue 583). (In Russ.)].
8. Детали роликового буксового узла из алюминиевого сплава / В. В. Новиков [и др.] // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов: межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1985. С. 11–15 [Novikov V. V., Tsyurenko V. N., Solodukho O. A., Dvukhglavov V. A., Zhakovskiy A. D. Aluminium alloy roller axlebox parts. In: *Questions of bogie parts optimisation and car maintenance organisation: interuniversity collection of scientific articles*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1985. p. 11–15. (In Russ.)].
9. Исследование прочности направляющих челюстей алюминиевых корпусов букс грузовых вагонов / В. В. Новиков [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1994. № 2. С. 19–21 [Novikov V. V., Shotashvili Ya. M., Solov'ev A. I., Bakhmutov V. F. Study of the strength of jaw guides of aluminium axleboxes of freight cars. *Russian Railway Science Journal*. 1994;(2):19–21. (In Russ.)].
10. Sun X., Han X., Dong C., Li X. Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation. In: Dobrzański L. A. (ed.) *Advanced Aluminum Composites and Alloys*. London: Intechopen; 2021. Vol. 9. 284 p. <http://doi.org/10.5772/intechopen.96442>.
11. Речкалов А. И. Опыт использования алюминиевых сплавов в зарубежном вагоностроении // Железнодорожный транспорт за рубежом. Серия II: Подвижной состав. Локомотивное и вагонное хозяйство. 1980. Вып. 6. С. 12–20 [Rechkalov A. I. Experience in the use of aluminium alloys in foreign railcar construction. *Zheleznodorozhnyy transport za rubezhom. Seriya II: Podvizhnoy sostav. Lokomotivnoye i vagonnoye khozyaystvo*. 1980;(6):12–20. (In Russ.)].
12. Веденкин С. Г. Алюминиевые сплавы для подвижного состава. М.: Трансжелдориздат, 1962. 44 с. [Vedenkin S. G. *Rolling stock aluminium alloys*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1962. 44 p. (In Russ.)].
13. Прессованные трубы из алюминиевых сплавов для деталей роликового буксового узла / В. В. Новиков [и др.] // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов: межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1985. С. 7–11 [Novikov V. V., Tkachuk Z. G., Semin N. A., Shishmentsev V. I. Extruded aluminium alloy tubes for roller axlebox components. In: *Questions of bogie parts optimisation and car maintenance organisation: interuniversity collection of scientific articles*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1985. p. 7–11. (In Russ.)].
14. Корпус роликовых букс грузовых вагонов из алюминиевых сплавов / Н. А. Буше [и др.] // Пути совершенствования конструкций буксовых узлов вагонов с подшипниками качения. М.: Транспорт, 1982. С. 98–102. (Труды ВНИИЖТ; вып. 654) [Bushe N. A., Tsyurenko V. N., Novikov V. V., Savchuk O. M. Aluminium alloy roller axle housings for freight cars. In: *Ways to improve car roller bearing axlebox design*. Moscow: Transport Publ.; 1982. p. 98–102. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 654). (In Russ.)].
15. Авдеев В. К. Влияние вибрации на процессы трения и износа сопряженных пар // Трение, износ и смазочные материалы: тр. междунар. научн. конф., Ташкент, 22–26 мая 1985 г. Ташкент: ТашПИ, 1985. Т. IV. С. 18–19 [Avdeev V. K. Influence of vibration on friction and wear of mating pairs. In: *Friction, wear and lubricants: proceedings of the international scientific conference, 22–26 May 1985, Tashkent*. Tashkent: TashPI; 1985. Vol. IV. p. 18–19. (In Russ.)].
16. Корпус буксы из алюминиевого сплава / Н. А. Буше [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1981. № 10. С. 53–55 [Bushe N. A., Savchuk O. M., Novikov V. V., Churin V. G., Frenkel V. Ya. Aluminium alloy axle housing. *Zheleznodorozhnyy transport*. 1981;(10):53–55. (In Russ.)].
17. Слушкин И. В. Разработка рациональных конструкций корпусов букс подвижного состава на роликовых подшипниках. М.: Трансжелдориздат, 1961. С. 110–136. (Труды ВНИИЖТ; вып. 221) [Slushkin I. V. *Rational design of rolling stock roller bearing axle housings*. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1961. p. 110–136. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 221). (In Russ.)].
18. Буше Н. А. Некоторые соображения о технической политике в области эксплуатационной надежности // Железные дороги мира. 2006. № 7. С. 27–30 [Bushe N. A. Some considerations on technical operational reliability policies. *Zheleznyye dorogi mira*. 2006;(7):27–30. (In Russ.)].
19. Новиков В. В., Шоташвили Я. М., Соловьев А. И. Совершенствование корпуса буксы из алюминиевого сплава // Вопросы совершенствования конструкции и технического содержания вагонов: межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1991. С. 13–20 [Novikov V. V., Shotashvili Ya. M., Solov'ev A. I. Improving aluminium alloy axle housing. In: *Issues of improvement of carriage design and maintenance: interuniversity collection of scientific articles*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1991. p. 13–20. (In Russ.)].
20. Савчук О. М., Пастернак Н. А., Жаковский А. Д. Сравнительные стендовые испытания корпусов роликовых букс // Совершенствование конструкции и обслуживания вагонов: межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1989. С. 12–18 [Savchuk O. M., Pasternak N. A., Zhakovskiy A. D. Comparative bench testing of roller axle housings. In: *Improving carriage design and maintenance: interuniversity collection of scientific articles*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1989. p. 12–18. (In Russ.)].
21. Буше Н. А., Копытько В. В. Причины овализации внутренней поверхности алюминиевых корпусов букс // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов: межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1985. С. 3–6 [Bushe N. A., Kopytko V. V. Causes of ovalisation of the inner surface of aluminium axle housings. In: *Questions of bogie parts optimisation and car maintenance organisation: interuniversity collection of scientific articles*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1985. p. 3–6. (In Russ.)].
22. Костеева Т. Н. Работоспособность подшипников в буксах грузовых вагонов с нагрузкой от оси на рельсы 250 кН // Пути совершенствования конструкций буксовых узлов вагонов с подшипниками качения. М.: Транспорт, 1982. С. 26–31 (Труды ВНИИЖТ; вып. 654) [Kosteeva T. N. Bearing serviceability in freight car axleboxes with axle-to-rail load of 250 kN. In: *Ways to improve car roller bearing axlebox design*. Moscow: Transport Publ.; 1982. p. 26–31. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 654). (In Russ.)].
23. Результаты статических испытаний роликовой буксы грузового вагона с корпусом из алюминиевого сплава / Ю. Д. Мельниченко [и др.] // Вопросы совершенствования тормозов подвижного состава в условиях Сибири и Дальнего Востока: межвуз. сб. науч. тр. / Хабаровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Хабаровск: ХаБииЖТ, 1985. С. 48–53 [Mel'nichenko Yu. D., Shmyrov Yu. A., Khusidov V. D., Chebanenko V. I. Results of static tests of aluminium alloy roller axlebox of a freight car. In: *Questions of improvement of rolling*

stock brakes in Siberia and the Far East: interuniversity collection of scientific articles. Khabarovsk: KhabIIZhT; 1985. p. 48–53. (In Russ.).

24. Стендовые испытания нагруженности подшипников в новых конструкциях алюминиевых корпусов букс грузовых вагонов / Н. А. Аверин [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1992. № 7. С. 37–41 [Averin N. A., Novikov V. V., Larionov N. V., Kamyshin A. N. Bench tests of bearing loading in new designs of aluminium axle housings of freight cars. *Russian Railway Science Journal*. 1992;(7):37-41. (In Russ.)].

25. Гриц Д. Б. Повышение ресурса консольно расположенных роликовых подшипников: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Омск, 2022. 206 с. [Grits D. B. *Improving the life of cantilevered roller bearings*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.02.02. Omsk; 2022. 206 p. (In Russ.)].

26. Кудрявцев Н. Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов. М.: Транспорт, 1977. 143 с. (Труды ВНИИЖТ; вып. 572) [Kudryavtsev N. N. *Dynamic loads of freight car undercarriages*. Moscow: Transport Publ.; 1977. 143 p. (Proceedings of the Railway Research Institute; Issue 572). (In Russ.)].

27. Морчиладзе И. Г., Соколов А. М. Совершенствование и модернизация буксовых узлов грузовых вагонов // Железные дороги мира. 2006. № 10. С. 59–64 [Morchiladze I. G., Sokolov A. M. Improving and upgrading freight car axleboxes. *Zheleznyye dorogi mira*. 2006;(10):59-64. (In Russ.)].

28. Влияние динамической нагруженности и дефектов роликов буксового подшипника на безопасность движения грузовых вагонов в эксплуатации / И. И. Галиев [и др.] // Известия Транссиба. 2013. № 4 (16). С. 102–110 [Galiev I. I., Nikolaev V. A., Sergeev B. B., Samohvalov E. A., Loucks D. Yu. The influence of dynamic loading and defects roller bearing axle-box on safety of movement of freight cars in operation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2013;(4):102-110. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rsywkn>.

29. Иванов С. Г., Новиков В. В., Аверин Н. А. Исследование нагруженности подшипников в алюминиевом и типовом стальном корпусах букс грузового вагона // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1988. № 7. С. 46–48 [Ivanov S. G., Novikov V. V., Averin N. A. Study of bearing loading in aluminium and standard steel axle housings of freight cars. *Russian Railway Science Journal*. 1988;(7):46-48. (In Russ.)].

30. Исследования распределения нагрузки на ролики подшипника в корпусе буксы из алюминиевого сплава / В. К. Бурякин [и др.] // Повышение надежности узлов вагонов / Днепропетровский ин-т инженеров ж.-д. транспорта. Днепропетровск: ДИИТ, 1971. С. 19–28. (Труды ДИИТ; вып. 133) [Buryakin V. K., Korosteev I. M., Novikov V. V., Reutskiy N. P. *Study of load distribution on bearing rollers in an aluminium alloy axle housing*. Dnepropetrovsk: Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; 1971. p. 19–28. (Proceedings of the Dnepropetrovsk Institute of Railway Engineers; Issue 133). (In Russ.)].

31. Писаренко Г. С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев: АН УССР, 1962. 436 с. [Pisarenko G. S. *Energy dissipation in mechanical oscillations*. Kiev: AN USSR; 1962. 436 p. (In Russ.)].

32. Опыт эксплуатации роликовых буксовых узлов с корпусами из алюминиевого сплава / В. В. Копытко [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1992. № 5. С. 45–47 [Kopytko V. V., Ivanov S. G., Savchuk O. M., Pasternak N. A., Zhakovskiy A. D. Operating experience of roller axlebox units with aluminium alloy housings. *Russian Railway Science Journal*. 1992;(5):45-47. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Владимирович ЛАПА, руководитель проекта, Департамент развития потребления алюминия, Объединенная компания РУСАЛ Торговый дом (121096, Россия, г. Москва, ул. Василисы Кожинной, д. 1), <https://orcid.org/0009-0003-0184-4336>

Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 384806, <https://orcid.org/0000-0002-1100-7326>

Сергей Васильевич НОВИКОВ, канд. техн. наук, действительный член Международной академии транспорта; заместитель генерального директора, РИЦ «ТЕХНОСФЕРА» (125319, Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16), Author ID: 880795, <https://orcid.org/0000-0002-0943-9488>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. LAPA, Project Manager, Department of Aluminium Consumption Development, United Company RUSAL Trading House (121096, Moscow, 1, Vasilisy Kozhinoy St.), <https://orcid.org/0009-0003-0184-4336>

Iosif S. GERSHMAN, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 384806, <https://orcid.org/0000-0002-1100-7326>

Sergey V. NOVIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Full Member of the International Transport Academy; Deputy Director General, TECHNOSPHERE Advertising and Publishing (125319, Moscow, 16, Krasnoproletarskaya St.), Author ID: 880795, <https://orcid.org/0000-0002-0943-9488>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Владимирович ЛАПА. Поиск информации, подготовка текста статьи (34%).

Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН. Руководство работой над подготовкой статьи, помощь в поиске информации (33%).

Сергей Васильевич НОВИКОВ. Редактирование текста, помощь в поиске информации (33%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander V. LAPA. Finding information, article preparation (34%).

Iosif S. GERSHMAN. Guidance in article preparation, assistance in finding information (33%).

Sergey V. NOVIKOV. Text editing, assistance in finding information (33%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023, рецензия от первого рецензента получена 22.12.2023, рецензия от второго рецензента получена 15.01.2024, принята к публикации 25.01.2024.

The article was submitted 13.11.2023, first review received 22.12.2023, second review received 15.01.2024, accepted for publication 25.01.2024.



**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
«РЕЕСТР ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ»
(АСУ «РИС») 2.0**

А. А. Воронков, Е. В. Першин, Е. А. Полякова,
А. А. Ратников, В. А. Исаева

Система представляет собой программное обеспечение, применение которого позволяет автоматизировать процесс управления данными, а также осуществлять мониторинг сведений.

В программе для ЭВМ реализованы следующие функциональности: централизованное хранение всех сведений о РИД, анализ статических данных в виде графиков и таблиц, автоматизированный контроль за соблюдением сроков ведения переписки, оплаты пошлин и процессов внедрения и использования РИД.

Программа для ЭВМ применяется в области учета возникновения и прекращения интеллектуальных прав.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

№ 2024615324 от 05.03.2024.

Заявка № 2024613775 от 22.02.2024

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ВЕДЕНИЯ СОЕДИНЕННЫМИ ПОЕЗДАМИ
ПО РАДИОКАНАЛУ, РЕАЛИЗУЮЩАЯ
ФУНКЦИОНАЛ УПРАВЛЕНИЯ С ОДНОГО ПОСТА
ГОЛОВНОГО ЛОКОМОТИВА
(АВ-РТ С САУ-ОП)**

М. В. Худорожко, Н. Б. Никифорова, И. А. Елисеев,
А. В. Стельмашенко, И. П. Крюков

Система представляет собой программное обеспечение, применение которого позволяет повысить производительность труда за счет сокращения работников локомотивных бригад без нарушения требований безопасности и обеспечивает:

- синхронное и асинхронное управление соединенным поездом по радиоканалу по командам с поста управления ведущего локомотива;
- автоматизированное дистанционное включение режима экстренного торможения на ведомом локомотиве;
- взаимодействие с радиомодемами метрового и гектометрового диапазонов в рамках утвержденных протоколов информационного обмена;
- передачу диагностической информации с ведомого на ведущий локомотив и отображение ее по каждой секции на главном экране в архиве диагностических сообщений и т. д.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

№ 2024614606 от 28.02.2024.

Заявка № 2023688115 от 15.12.2023

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНО-
КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОБЪЕКТЫ
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (МПКФИ)**

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
С. В. Лобанов, А. Р. Загидулин, Е. С. Делицин

Программа представляет собой геоинформационную систему, реализованную в виде web-приложения с базами данных природно-климатических факторов и объектов транспортной инфраструктуры. В программе реализованы следующие функциональности: мониторинг природно-климатических факторов, прогнозирование их развития на долгосрочном (с использованием

архивов метеорологических, гидрологических, сейсмологических и геоэкологических данных) и оперативном (с использованием открытых прогностических метеорологических моделей) горизонте, расчет их комплексного воздействия на состояние и надежность инженерных сооружений транспортной инфраструктуры с учетом их характеристик — для поддержки принятия решений в сегменте безопасности движения. Программа используется для повышения эффективности и снижения трудозатрат в ходе проведения анализа воздействия внешних природно-техногенных факторов на состояние и надежность инженерных сооружений.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

№ 2024614608 от 28.02.2024.

Заявка № 2023688071 от 15.12.2023

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРЕНАЖЕР ОБУЧЕНИЯ
МАШИНИСТОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМУ ВЕДЕНИЮ
ПОЕЗДА (СТМЭ)**

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов,
Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябко

Специализированный тренажер предназначен для использования при профессиональной подготовке, самоподготовке и повышении квалификации машинистов для обучения навыкам энергосберегающего управления движением поезда по заданному расписанию. Тренажер состоит из связанных между собой модулей рабочего места инструктора и рабочего места обучаемого машиниста, реализованных

на базе персонального компьютера, с отображением информационно-управляющего поля машиниста средствами трехмерной компьютерной графики с возможностью подключения специализированного пульта управления локомотивом, модуля энергооптимального тягового расчета и модуля регистрации результатов тренажа в базе данных.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

№ 2023686850 от 08.12.2023.

Заявка № 2023684801 от 17.11.2023

По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru

МОНОГРАФИИ И СБОРНИКИ

Научно-издательский отдел предлагает приобрести Труды АО «ВНИИЖТ»:

- Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: КУНА, 2023. — 280 с.
- Силюта А.Г. Методология выбора рациональных характеристик автономных локомотивов. — М.: КУНА, 2023. — 86 с.
- Рожицкий Д.Б. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов. — М.: РАС, 2022. — 324 с.
- Электробезопасность электроустановок транспорта / А.Б. Косарев, С.А. Виноградов, Ю.Н. Король, И.А. Косарев. — М.: РАС, 2022. — 448 с.
- Кондрашов В.М., Максимов И.Н. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей. — М.: РАС, 2022. — 105 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Т. 1. Грузовые вагоны / под ред. С.М. Захарова. — М.: ИННА, 2021. — 456 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Т. 2. Грузовые локомотивы / под ред. С.М. Захарова. — М.: ИННА, 2021. — 344 с.
- Марков Д.П. Атомно-молекулярные механизмы вещественного трения. — М.: РАС, 2019. — 104 с.
- Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 1 / под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричиани. — М.: РАС, 2019. — 272 с.
- Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 2 / под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричиани. — М.: РАС, 2019. — 300 с.
- Ромен Ю.С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. — М.: РАС, 2019. — 160 с.
- АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А.В. Комиссарова. — М.: РАС, 2019. — 168 с.
- Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / под ред. А.М. Бржезовского. — М.: РАС, 2019. — 152 с.
- Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / под ред. О.Ф. Мирошниченко. — М.: РАС, 2019. — 210 с.
- Певзнер В.О. Научные основы системы управления состоянием пути. — М.: РАС, 2018. — 272 с.
- Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / под ред. А.Б. Косарева, О.Н. Назарова. — М.: РАС, 2018. — 119 с.
- Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах / под ред. А.Ю. Абдурашитова. — М.: РАС, 2017. — 160 с.
- Вопросы развития железнодорожного транспорта / под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричиани. — М.: РАС, 2017. — 270 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо — рельс / под ред. С.М. Захарова. — М.: Интекст, 2017. — 420 с.
- Савин А.В. Безбалластный путь. — М.: РАС, 2017. — 192 с.
- Коган А.Я., Загитов Э.Д., Полещук И.В. Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава. — М.: РАС, 2016. — 210 с.
- Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). — М.: Аналитика Родис, 2016. — 330 с.
- Антюхин Г.Г., Поварков И.Л. Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами. — М.: Аналитика Родис, 2016. — 104 с.

- Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. — М.: Научный мир, 2015. — 202 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. — 166 с.
- Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — 210 с.
- Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л.А. Мугинштейн, А.И. Молчанов, С.А. Виноградов, К.М. Попов, Е.Н. Школьников. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — 144 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. — 258 с.
- Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России: научно-методическое пособие / под ред. М.М. Толкачевой, Г.Е. Писаревского. — М.: 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.: Интекст, 2014. — 416 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе развития / под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричани. — М.: Интекст, 2013. — 288 с.
- Путь и путевое хозяйство. Взаимодействие колеса и рельса / под ред. М.М. Железнова. — М.: Интекст, 2013. — 236 с.
- Лapidус Б.М. Железнодорожный бизнес: как встать на главный путь. — М.: 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.: Интекст, 2013. — 224 с.
- Заручейский А.В., Гребенюк П.Т. Экспериментальные исследования процессов движения подвижного состава. — М.: Интекст, 2012. — 76 с.
- Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации / под ред. А.Ю. Абдурашитова. — М.: Интекст, 2012. — 88 с.
- Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов / под ред. Л.А. Мугинштейна. — М.: Интекст, 2012. — 56 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / под ред. С.М. Захарова. — М.: Интекст, 2012. — 568 с.
- Проблемы железнодорожного транспорта. Задачи и пути их решения / под ред. Б.М. Лapidуса, Г.В. Гогричани. — М.: Интекст, 2012. — 260 с.
- Мугинштейн Л.А., Ябко И.А., Илютович А.Е. Энергооптимальные методы управления движением поездов. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.

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

Актуальная информация о Трудах ВНИИЖТ доступна на сайте (переход через QR-код):



