

ISSN 2223-9731 (Print)
ISSN 2713-2560 (Online)
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1

ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL (VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 81, №1. 2022
(VOL. 81, No.1. 2022)

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

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

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

Издается с 1942 г.
Периодичность: 4 номера в год
Подписной индекс: 70116
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35600

Founder:
JSC Railway Research Institute

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

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

Published since 1942
Periodicity: Quarterly
Subscription index: 70116
Registration Certificate
PI No. FS77-35600

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

© АО «ВНИИЖТ», 2022

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

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

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

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

- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.17. Материаловедение (технические науки)
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)
- 05.02.02. Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
- 05.22.01. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)

Журнал индексируется и архивируется в:
Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)
EBSCO
Ulrichsweb Global Serials Directory
The European Library
ВИНИТИ РАН

Журнал является членом
Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ)
CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



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

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

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

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

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

The journal is indexed and archived in:
Russian Science Citation Index
EBSCO
Ulrichsweb Global Serials Directory
The European Library
VINITI RAS

The journal is a member of the Association of Science Editors and Publishers (ASEP)
CrossRef

Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Глюзберг Борис Эйнихович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

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

Ерофеев Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

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

Коган Александр Яковлевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

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, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Мирошниченко Ольга Федоровна, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Савин Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация

Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

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

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

Фёдоров Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Калининград, Российская Федерация

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

Шур Евгений Авелевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Виноградов С. А., председатель, канд. техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия

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

Дынькин Б. Е., д-р техн. наук, проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

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

Липидус Б. М., д-р экон. наук, проф., Объединенный ученый совет ОАО «РЖД», Москва, Россия

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

Махутов Н. А., д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИММАШ РАН, Москва, Россия

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

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

Розенберг Е. Н., д-р техн. наук, проф., АО «НИИАС», Москва, Россия

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

Шенфельд К. П., д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия

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

Подписано к печати 25.03.2022. Формат бумаги 60×90 1/8.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,25. Тираж 300 экз. Заказ 129.

Цена свободная

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Boris E. Glyzberg, Dr. of Sci. (Economics), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation

Georgy V. Gogrichiani, Dr. of Sci. (Engineering), JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8586-8068>

Mikhail N. Erofeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow, Russian Federation

Sergey M. Zakharov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Alexander Ya. Kogan, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Associate, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation

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

Vladislav V. Kuchumov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Olga F. Miroshnichenko, Dr. of Sci. (Economics), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation

Lev A. Muginshtein, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation

Alexander V. Savin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice-Rector of the Russian Transport University, Moscow, Russian Federation

Nina F. Sirina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

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

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

Sergey V. Fedorov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

Herman S. Fox-Rabinovich, Dr. of Sci. (Engineering), Chief Researcher of McMaster Engineering University, Hamilton, Ontario, Canada

Evgeniy A. Schur, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, JSC "VNIIZhT", Moscow, Russian Federation

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

EDITORIAL COUNCIL

Sergey A. Vinogradov, Chairman, Cand. of Sci. (Engineering), General Director of the Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

Dmitriy A. Macheret, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, Russian Federation

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

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

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

Konstantin P. Shenfeld, Dr. of Sci. (Engineering), Executive Director of the Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, Russian Federation

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

Signed to print on 25.03.2022. Format is 60×90 1/8.
Offset printing. 11.25 printed sheets. 300 copies. Order No. 129.

Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне

А. Б. Косарев, Р. А. Рудашевский, А. В. Рудашевская, П. И. Смолин, И. А. Ребров 7–15

Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе

А. А. Крылов, И. А. Ребров, А. В. Рудашевская, Р. А. Рудашевский, Е. Д. Харьковская 16–22

Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава

Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев, В. К. Духовников, А. В. Гуляев 23–30

О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения

В. А. Кучумов, И. Н. Никончук 31–37

О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока

В. Л. Незевак 38–52

Современные подходы к оценке эффективности создаваемых транспортных средств

А. Г. Силюта, А. Г. Силюта, Д. М. Маяков 53–62

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок

Н. В. Корниенко, М. И. Мехедов 63–70

Развитие системы оценки качества выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов: постановка вопроса

М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, Е. А. Мехедова 71–79

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути

Е. Н. Ефимова, Н. П. Виногоров, А. А. Шиладжян, В. М. Кошелев,
Д. А. Валов, Н. В. Кузнецова 80–88

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Determination of the rail-to-earth transition resistance of the ballastless track and influence of the resistance on the current spreading in the subgrade

Alexander B. Kosarev, Roman A. Rudashevskiy, Anna V. Rudashevskaya,
Pavel I. Smolin, Il'ya A. Rebrov 7–15

Transition resistance influence of the upper structure track ballast on the rail-to-earth potential at AC railway sections

Anton A. Krylov, Il'ya A. Rebrov, Anna V. Rudashevskaya, Roman A. Rudashevskiy,
Elena D. Khar'kovskaya 16–22

Modeling vector control of the asynchronous drive of electric rolling stock auxiliary machines

Yuriy M. Kulinich, Sergey A. Shukharev, Vyacheslav K. Dukhovnikov, Alexander V. Gulyaev 23–30

Implementation of regenerative braking on the AC locomotive with a monophas reversible voltage converter

Vladislav A. Kuchumov, Ivan N. Nikonchuk 31–37

Comparison of energy parameters of electric storage systems for DC and AC traction power supply systems

Vladislav L. Nezevak 38–52

Modern approaches to the efficiency assessing of created vehicles

Anatoliy G. Silyuta, Artur G. Silyuta, Denis M. Mayakov 53–62

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes

Natal'ya V. Kornienko, Mikhail I. Mekhedov 63–70

Development of the quality assessment system of passenger and suburban train traffic: raising an issue

Mikhail I. Mekhedov, Evgeniy A. Sotnikov, Evgeniya A. Mekhedova 71–79

ECONOMICS AND MANAGEMENT

Methodological approaches to the efficient functioning assessment of the modern upper structure track

Elena N. Efimova, Nikolay P. Vinogorov, Alla A. Shiladzhyan,
Vladimir M. Koshelev, Dmitriy A. Valov, Natal'ya V. Kuznetsova 80–88

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.331.1:625.14

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ РЕЛЬСОМ И ЗЕМЛЕЙ ДЛЯ БЕЗБАЛЛАСТНОГО ПУТИ И ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА РАСТЕКАНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ В ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ

А. Б. Косарев¹, Р. А. Рудашевский^{1,2}, А. В. Рудашевская^{1,2},
П. И. Смолин^{1,2}, И. А. Ребров^{1,2} ✉

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

² Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave.,
Sochi, Russian Federation

АННОТАЦИЯ

Введение. Переходное сопротивление рельсовый путь — земля является важным параметром электрифицированных железных дорог, который напрямую влияет на уровень электробезопасности тяговой сети и распределение потенциала в зоне верхнего строения пути. Повышенный потенциал негативно влияет на процесс эксплуатации системы электроснабжения, безопасность пассажиров и обслуживающего персонала станции, а также может вызвать повреждение изоляции сигнального оборудования и несет угрозу безопасности движению поездов. Развитие высокоскоростного движения в России предполагает применение безбалластной конструкции пути. Переходное сопротивление безбалластного пути отличается от сопротивления балластного пути.

Материалы и методы. В статье рассмотрена математическая модель безбалластного пути для определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля. Также представлено описание метода определения переходного сопротивления при известном входном сопротивлении рельсового пути, определенном экспериментальным путем.

Результаты. Представлены относительные значения падения напряжения на элементах строения безбалластного пути. Полученные данные будут использоваться для анализа и расчетов режимов работы системы тягового электроснабжения, возникающих в рельсовом пути при коротких замыканиях в тяговой сети, и оценки электромагнитной совместимости электроустановок.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволят проводить исследования переходного сопротивления безбалластного пути при стекании с рельсов больших токов короткого замыкания, в том числе посредством имитации короткого замыкания на перегоне вблизи и в отдалении от тяговой подстанции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовый путь, переходное сопротивление, схема замещения, математическая модель, система тягового электроснабжения, безбалластный путь, высокоскоростная магистраль, тяговая сеть

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51017.

Для цитирования: Косарев А. Б., Рудашевский Р. А., Рудашевская А. В., Смолин П. И., Ребров И. А. Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 7–15. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15>.

Original article

UDK 621.331.1:625.14

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15



DETERMINATION OF THE RAIL-TO-EARTH TRANSITION RESISTANCE OF THE BALLASTLESS TRACK AND INFLUENCE OF THE RESISTANCE ON THE CURRENT SPREADING IN THE SUBGRADE

Alexander B. Kosarev¹, Roman A. Rudashevskiy^{1,2},
Anna V. Rudashevskaya^{1,2}, Pavel I. Smolin^{1,2},
Il'ya A. Rebrov^{1,2}✉

¹Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

²Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave.,
Sochi, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rail-to-earth transition resistance is an important parameter of electrified railways, which directly affects the electrical safety level of the traction network and the potential distribution in the upper structure track area. The increased potential adversely affects the operation of the power supply system, the safety of passengers and service staff. Moreover, the mentioned potential leads to the insulation damage of the signaling equipment and to the threat of the train traffic security. The high-speed traffic development in Russia involves the ballastless track usage. The transition resistance of the ballastless track differs from that of a ballast track.

Materials and methods. The article considers mathematical model of the ballastless track for determining the rail-to-earth transition resistance. The authors presented a description of the method for rail-to-earth transition resistance with a known input resistance of the rail track, determined experimentally.

Results. The paper demonstrates relative values of the voltage drop on the ballastless track structural elements. The obtained data will be used to analyse and calculate the modes of operation of the traction power supply system that occur in the rail track during short circuits in the traction network, and to assess the electromagnetic compatibility of electrical installations.

Discussion and conclusion. Obtained results will lead to study the transition resistance of the ballastless track concerning high short-circuit currents drainage from the rails by simulating a short circuit both near the traction substation and away from it.

KEYWORDS: rail track, transition resistance, equivalent circuit, mathematical model, traction power supply system, ballastless track, high-speed highway, traction network

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project number 20-38-51017.

For citation: Kosarev A. B., Rudashevskiy R. A., Rudashevskaya A. V., Smolin P. I., Rebrov I. A. Determination of the rail-to-earth transition resistance of the ballastless track and influence of the resistance on the current spreading in the subgrade. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):7–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-7-15>.

Введение. Высокоскоростная магистраль (ВСМ) проектируется как единый технологический комплекс, включающий в себя совокупность подсистем железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. В современных условиях необходимо применять новые конструкции пути, обеспечивающие высокую стабильность при повышенных скоростях движения поездов, а также минимизацию времени на все виды путевых работ.

Верхним строением пути является составная часть подсистемы железнодорожного пути инфраструктуры высокоскоростного железнодорожного транспорта, предназначенная для обеспечения пространственной стабильности рельсовой колеи и направляющей функции для колес подвижного состава, распределения нагрузки от подвижного состава на нижнее строение пути и снижения генерируемых подвижным составом вибраций до приемлемого уровня. Верхнее строение пути может быть представлено безбалластной конструкцией или конструкцией на балласте.

Одними из преимуществ безбалластного верхнего строения пути являются низкие затраты на текущее содержание железнодорожного пути и устойчивость бесстыкового пути. При этом есть ряд недостатков, таких как высокая стоимость строительства, повышенный уровень шума, высокие требования к выбору строительных материалов [1, 2].

Важно отметить, что рельсовый путь не только обеспечивает механическую поддержку для подвижного состава, но также выполняет роль проводника как для канализации обратного тягового тока, так и для сигналов рельсовой цепи. Значение тока утечки с рельсов на землю зависит от потенциала рельсов относительно земли, их сопротивления, переходного сопротивления рельсовый путь — земля и метеорологических условий. Утечка происходит с подошвы рельсов через костыли, шурупы и подкладки, противоугоны, междурельсовые и междупутные соединения и заземляющие устройства.

С увеличением скоростей движения и массы поездов повышается нагрузка на систему тягового электроснабжения и, как следствие, соответственно увеличивается обратный тяговый ток. Это влияет также на устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), в том числе на длину, чувствительность и безопасность передачи сигнала в рельсовых цепях. Предположим, что собственное сопротивление рельса и тяговый ток имеют неизменные значения. Если сопротивление току утечки с рельсового пути на землю слишком велико, это может вызвать появление повышенного электрического потенциала в рельсовом пути. Повышенный потенциал негативно влияет на процесс эксплуатации системы электроснабжения, безопасность пассажиров и обслуживающего персонала станции, а также может вызвать повреждение

изоляции сигнального оборудования и несет угрозу безопасности движущихся поездов [3].

Из-за повышенной нагрузки, которую оказывает на рельсовый путь высокоскоростной подвижной состав, прокладка между рельсами и подложкой пути в безбалластном пути, как правило, утолщена, что делает такой путь более электроизоляционным. Сигналы управления системы СЦБ также требуют хорошей изоляции между двумя рельсами и между рельсами и землей. Эти факторы приводят к большему сопротивлению утечке тока с рельсового пути на землю. Для высокоскоростной железной дороги необходимо принять соответствующие меры для снижения тока пути и потенциала рельсов. Таким образом, для того чтобы добиться хорошей электромагнитной совместимости между системой тягового электроснабжения и сигналами управления СЦБ, при строительстве и эксплуатации электрифицированной высокоскоростной железной дороги необходимо знать и учитывать точное значение сопротивления токам утечки с рельсов и распределенной емкости между землей и рельсовым путем.

Построение математической модели. Сопротивление току утечки с рельсового пути на землю является важным параметром для определения токов и напряжений в земле. Расчетная схема общей картины протекания токов в рельсах и земле представлена на рис. 1.

Поскольку рельсы не изолированы от земли, ток проходит и по земле. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на ряд рассматриваемых параметров, в том числе на сопротивление тяговой сети. В [4, 5] рассматривается схема замещения с одной составляющей переходного сопротивления рельсовый путь — земля. Однако для случая безбалластного пути, строение которого значительно отличается [6] от балластного пути, предлагается рассмотреть схему замещения с несколькими составляющими переходного сопротивления: рельсы, крепления рельсов, армированный бетонный слой, подстилающий слой и земляное полотно.

Значение переходного сопротивления проводник — земля определяется по формуле [7]:

$$r_n = r'_n + r''_n, \quad (1)$$

где r'_n — переходное сопротивление бесконечно тонкого слоя изоляции между проводником и поверхностью земли, Ом·км.

Составляющая переходного сопротивления проводник — земля r''_n зависит от сопротивления земли [8]:

$$r''_n = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha \gamma}, \quad (2)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление однородной земли, Ом·м; α — эквивалентный радиус

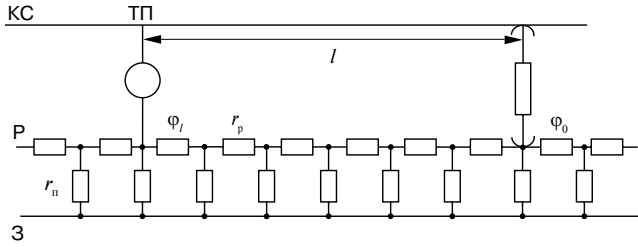


Рис. 1. Общая расчетная схема протекания токов в рельсах и земле:

КС — контактная сеть; ТП — тяговая подстанция; Р — рельс; З — земля; l — расстояние между тяговыми подстанциями; φ_l — потенциал рельса на расстоянии l ; r_p — сопротивление 1 км рельсового пути; r_n — переходное сопротивление от рельса к земле; φ_0 — потенциал рельса у нагрузки

Fig. 1. General design model for the flow of currents in rails and earth: КС — contact network; ТП — traction substation; Р — rail; З — earth; l — distance between traction substations; φ_l — potential of the rail at a distance l ; r_p — resistance of the 1 km rail track; r_n — rail-to-earth transition resistance; φ_0 — rail potential at the load

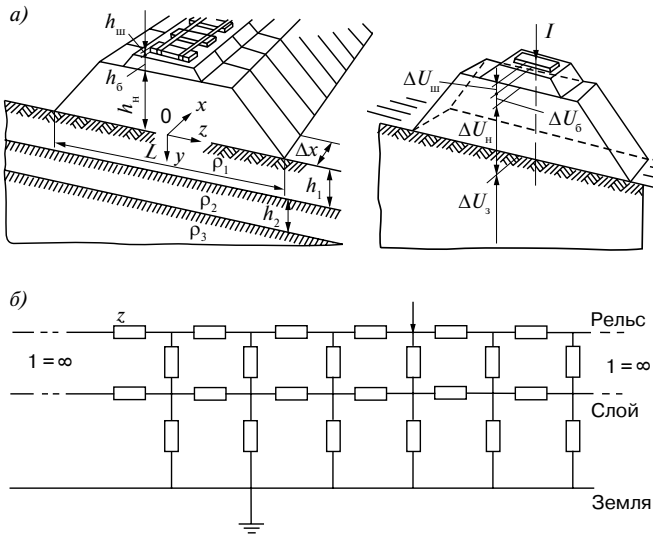


Рис. 2. Безбалластный путь:

a — конструкция: h_w, h_6, h_n — высота шпалы, безбалластного основания и насыпи; h_1, h_2 — мощности слоев земли; ρ_1, ρ_2, ρ_3 — удельные электрические сопротивления слоев земли; L — ширина основания насыпи; I — приложенный ток; ΔU_w — падение напряжения на шпале; ΔU_n — падение напряжения на теле насыпи; ΔU_6 — падение напряжения на безбалластном слое; ΔU_3 — падение напряжения на земле; Δx — расчетный шаг элемента пути; b — модель переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — земля: z — элементы схемы замещения участка рельсовый путь — земля

Fig. 2. Ballastless track:

a — construction: h_w, h_6, h_n — height of the sleeper, non-ballast base and embankment; h_1, h_2 — thicknesses of the earth layers; ρ_1, ρ_2, ρ_3 — specific electrical resistance of the earth layers; L — width of the embankment base; I — applied current; ΔU_w — voltage drop across the sleeper; ΔU_n — voltage drop on the back of ballast bed; ΔU_6 — voltage drop on the non-ballast layer; ΔU_3 — voltage drop on the earth; Δx — calculated step of the track element; b — model of the rail track — ballastless base — earth transition resistance: z — equivalent circuit elements of the rail-to-earth section

проводника; γ — коэффициент распространения эквивалентной длинной линии, $\gamma = \sqrt{Z_p / r_n}$ (Z_p — продольное сопротивление проводника, Ом/м).

Значение r_n' в формуле (1) обусловлено сопротивлением шпал, балласта и земляного полотна. Поэтому для конструкций безбалластного пути определение зависимости r_n' от сопротивления шпал, безбалластного основания и земляного полотна (насыпи) представляет практический и теоретический интерес.

Рассмотрим модель переходного сопротивления рельсовый путь — земля, позволяющую установить распределение потенциала на поверхности шпал, безбалластного основания, насыпи и земли в зависимости от удельного электрического сопротивления с учетом реальной геометрии этих составляющих (рис. 2, a).

В основу построения модели переходного сопротивления безбалластного пути положим следующие допущения. Прямолинейный однородный проводник бесконечной длины, обладающий продольным сопротивлением на 1 км длины (определение значения сопротивления 1 км рельсов будет представлено ниже), имеет дискретный контакт с землей только через последовательно соединенные сопротивления шпалы R_w , безбалластного основания R_6 , насыпи R_n , земли R_3 . Шпалы расположены равномерно с постоянным шагом Δx . Удельные электрические сопротивления шпалы, безбалластного основания, насыпи (ρ_w, ρ_6, ρ_n) постоянны, однородная земля характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ . Поверхность земли горизонтальна. Геометрические размеры шпал, безбалластного основания, насыпи неизменны на всем протяжении. При расчете сопротивления безбалластного основания и насыпи допустимо пренебрегать продольной составляющей. Электрические параметры системы линейны во всем рассматриваемом диапазоне токов. Поскольку на безбалластном пути шпалы и монолитная основа состоят из однородного армированного бетонного слоя, составляющие R_w и R_6 можно объединить (R_{w6}).

Рассмотрим математическую модель, в которой приложенный ток находится в произвольной точке рельсов [7]. Приложенный ток I изменяется во времени по закону $Ie^{i\omega t}$. В силу симметрии системы достаточно рассмотреть процесс одностороннего растекания тока, втекающего в произвольную точку рельса [9]. С учетом принятых допущений математическая модель переходного сопротивления будет выглядеть следующим образом: рельсовый путь — безбалластное основание — земля (рис. 2, b).

Для любой точки рельсового пути x напряжение рельсовый путь — земля на участке Δx можно записать в виде

$$U_2 = \Delta U_w(x) + \Delta U_6(x) + \Delta U_n(x) + \varphi_3(x), \quad (3)$$

где $\Delta U_{\text{ш}}(x), \Delta U_6(x), \Delta U_{\text{н}}(x)$ — падение напряжения в шпале, безбалластном основании и теле насыпи, В; $\varphi_3(x)$ — потенциал земли, В.

Уравнение (3) можно представить в виде

$$U_2 = \Delta I_i(x)(R_{\text{ш}} + R_6 + R_{\text{н}} + R_3), \quad (4)$$

где $\Delta I_i(x)$ — ток утечки с рельса на землю через i -й контакт, А.

Сопротивление безбалластного основания и насыпи определяется по формуле (5) для каждого участка рельсового пути Δx

$$R_{\text{ш}} = \rho_{\text{ш}} \frac{h_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}}; R_6 = \rho_6 \frac{h_6}{\Delta S_6}; R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \frac{h_{\text{н}}}{\Delta S_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{ш}}$ — площадь подошвы шпалы, м^2 ; $\Delta S_6, \Delta S_{\text{н}}$ — площади продольных сечений безбалластного основания и насыпи по средней линии для участка рельсового пути, м^2 .

Метод определения переходного сопротивления.

Ниже предложен алгоритм расчета переходного сопротивления рельсовый путь — земля на основании входного сопротивления рельсовый путь — земля, определенного экспериментальным путем.

Входное сопротивление рельсового пути на частоте ω , превышающей $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$, определяется по формуле

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_{\text{р}}}{g_{\text{р}} + j\omega C_{\text{р}}}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{р}}$ — продольное сопротивление рельсового пути на частоте ω ; $g_{\text{р}}$ — поперечная проводимость рельсовый путь — земля, $g_{\text{р}} = 1/r_{\text{п}}$; $C_{\text{р}}$ — емкость рельсового пути относительно земли.

Зная $Z_{\text{вх}}$, можно определить $r_{\text{п}}$ из выражения

$$r_{\text{п}} = \frac{4Z_{\text{вх}}^2}{Z_{\text{р}} - 4Z_{\text{вх}}^2 j\omega C_{\text{р}}}. \quad (7)$$

Продольное сопротивление рельсового пути на частоте ω определяется по формуле

$$Z_{\text{р}} = j\omega L_{\text{внш}} + j\omega \frac{1}{P_{\text{р}}} \sqrt{\frac{\omega \mu}{\gamma}} 0,6 + \frac{1}{P_{\text{р}}} \sqrt{\frac{\omega \mu}{\gamma}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{внш}}$ — индуктивность контура рельсовый путь — земля; $P_{\text{р}}$ — периметр рельса; μ — абсолютная магнитная проницаемость рельсовой стали, при расчетах принимаем $\mu = 100\mu_0$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; γ — удельная электрическая проводимость рельсовой стали.

Емкость рельсового пути согласно расчетам составляет $C_{\text{р}} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}$.

Емкость рельсового пути (материала) колеблется в зависимости от диэлектрической проницаемости безбалластного основания. В этой связи желательно выбрать такую частоту тока, подаваемого в рельсовую

цепь, при которой емкостное сопротивление $1/\omega C_{\text{р}}$ было бы существенно больше переходного сопротивления рельсовый путь — земля.

Принимая условия [10] определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля при $k = 2 [\text{Ом/км}]$, следует

$$r_{\text{п}} = kZ_{\text{вх}}^2 [\text{Ом} \cdot \text{км}], \quad (9)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — модуль входного сопротивления в Ом при $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$, определяемый экспериментальным путем.

Таким образом, при известном, определенном экспериментальным путем входном сопротивлении, переходное сопротивление рельсовый путь — земля можно рассчитать по приведенному выше соотношению.

Результаты и обсуждение. Для расчета переходного сопротивления рассмотрим участок безбалластного пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (рис. 3, а).

Конструкция состоит из модифицированных двухблочных шпал с арматурой, скреплений для безбалластной конструкции, монолитного армированного бетонного несущего слоя и гидравлически связанного несущего слоя.

Бетонный несущий слой шириной 2,8 м и толщиной 0,240 м опирается на гидравлически связанный несущий слой шириной 3,4 м и толщиной 0,300 м (рис. 3, б).

С учетом допущений высота шпал, армированного бетонного несущего слоя и гидравлически связанного несущего слоя $h_{\text{шб}} = h_{\text{ш}} + h_6 = 0,550 \text{ м}$, принятая средняя ширина основания насыпи $L = 3,1 \text{ м}$, $\Delta x = 0,25$.

Следовательно

$$R_{\text{шб}} = \rho_{\text{шб}} \frac{h_{\text{шб}}}{L\Delta x} = \rho_{\text{шб}} \frac{0,550}{3,1 \cdot 0,25} = 0,71\rho_{\text{шб}}. \quad (10)$$

В качестве размеров насыпи примем размеры слоя под бетонным основанием $h_{\text{н}} = 0,500 \text{ м}$, $L = 4 \text{ м}$, $\Delta x = 0,25$.

Тогда

$$R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \frac{h_{\text{н}}}{L\Delta x} = \rho_{\text{н}} \frac{0,500}{4 \cdot 0,25} = 0,5\rho_{\text{н}}. \quad (11)$$

В произвольной точке x математической модели эквивалентной линии с равномерно распределенными параметрами $Z_{\text{р}}$ и полного переходного сопротивления $Z_{\text{п}}$ для рассматриваемых условий определяется потенциал.

Воспользовавшись уравнением электрического равновесия и соотношением для потенциала земли, определим переходное сопротивление рельсовый путь — земля. Ток, стекающий с пластины в месте приложения нагрузки к бесконечному рельсовому пути, находим по формуле

$$\Delta I_{|x|=0} = 0,5\eta\gamma_2\Delta x I, \quad (12)$$

где η — коэффициент экранирования рельсового пути; γ_2 — постоянная распространения рельсового пути, км^{-1} , $0,1\text{км}^{-1} \leq |\gamma_2| \leq 2\text{км}^{-1}$.

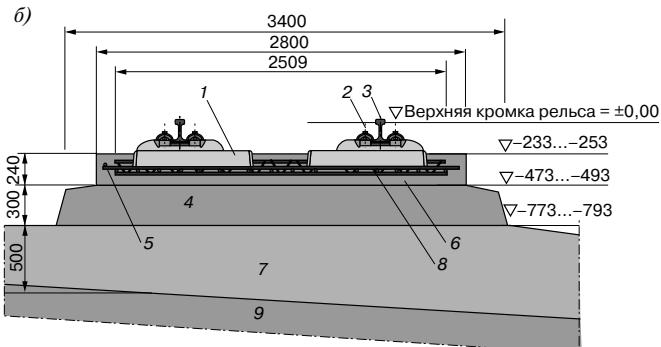
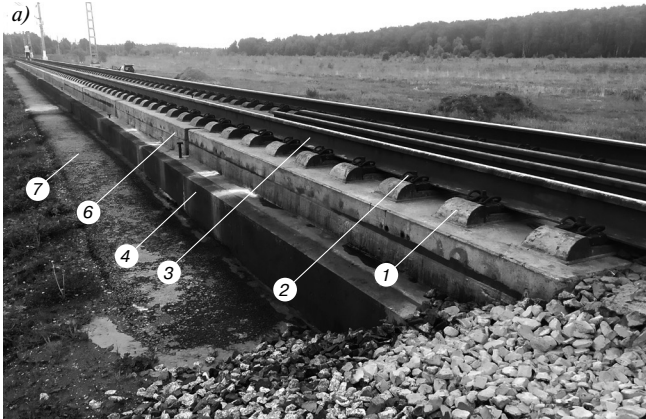


Рис. 3. Участок безбалластного пути на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»:
а — общий вид; б — конструкция пути:

1 — шпала В355 интервал 650 мм; 2 — крепление рельсов по системе Vossloh W300; 3 — рельс 60Е1; 4 — гидравлически связанный несущий слой; 5 — поперечное армирование 20; 6 — бетон железнодорожного полотна С30/37; 7 — морозозащитный слой; 8 — продольное армирование 18/20; 9 — постель балласта

Fig. 3. Section of the ballastless track on the JSC «VNIIZhT» Test Loop:
а — general view; б — track design:

1 — sleeper V355 interval 650 mm; 2 — fastening of rails according to the Vossloh W300 system; 3 — 60E1 rail; 4 — hydraulically connected carrier layer; 5 — transverse 20 reinforcement; 6 — concrete of the C30/37 railway track; 7 — frost-protective layer; 8 — longitudinal reinforcement 18/20; 9 — metal bed

Тогда падение напряжения в элементах верхнего строения пути будет определяться из следующих выражений:

$$\Delta U_2(x=0) = 0,5\eta Z_{\text{ш}} I; \quad (13)$$

$$\Delta U_{\text{ш}}(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x R_{\text{ш}} I; \quad (14)$$

$$\Delta U_6(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x \rho_6 \frac{h_6}{\Delta S_6} I; \quad (15)$$

$$\Delta U_{\text{н}}(x=0) = 0,5\eta\gamma_2\Delta x \rho_{\text{н}} \frac{h_{\text{н}}}{\Delta S_{\text{н}}} I, \quad (16)$$

где $Z_{\text{ш}}$ — волновое сопротивление рельсового пути, Ом, $Z_{\text{ш}} = \sqrt{Z_{\text{р}} r_{\text{ш}}}$.

Преобразовав уравнение (1), получим

$$r'_{\text{ш}} = \Delta x \cdot 10^{-3} (R_{\text{шб}} + R_{\text{н}}); \quad (17)$$

$$r'_{\text{н}} = \Delta x \cdot 10^{-3} (0,71\rho_{\text{шб}} + 0,5\rho_{\text{н}}). \quad (18)$$

После преобразования выражений получим

$$r'_{\text{ш}} = r_{\text{шб}} + r_{\text{н}}; \quad (19)$$

$$r_{\text{шб}} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{шб}}; \quad (20)$$

$$r_{\text{н}} = 0,125 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{н}}. \quad (21)$$

Переходное сопротивление земли принято $r''_{\text{н}} = 2,2 \cdot 10^{-3} \rho$.

Таким образом, для расчета переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — насыпь — земля может быть использована формула

$$r_{\text{п}} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{шб}} + 0,125 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{н}} + 2,2 \cdot 10^{-3} \rho. \quad (22)$$

Для решения этого уравнения необходимо определить удельные электрические сопротивления материала шпал, безбалластного основания и насыпи. Удельное сопротивление в решетке Веннера [11] определяется по формуле

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}, \quad (23)$$

где a — расстояние между электродами; V — падение напряжения между измеряемыми электродами; I — ток, подаваемый на электроды.

Значения удельного электрического сопротивления материалов представлены в таблице.

Исходя из результатов проведенных экспериментов, а также аналогичных исследований [7, 12, 13] могут быть рекомендованы следующие значения удельных электрических сопротивлений: $\rho_{\text{шб}} = 100 \cdot 10^3$, $\rho_{\text{н}} = 1 \cdot 10^3$, $\rho = 0,04 \cdot 10^3$.

Определение удельного электрического сопротивления материалов безбалластного пути проведено непосредственно на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» без отбора проб грунта по четырех-электродной схеме. Электроды размещались на поверхности земли по одной прямой линии, совпадающей с осью трассы для проектируемого сооружения, а для сооружения, уложенного в землю, на линии, проходящей перпендикулярно или параллельно, —

на расстоянии в пределах от 2 до 4 м от оси сооружения. Измерения были выполнены с интервалом от 100 до 200 м в период, когда на глубине заложения сооружения отсутствует промерзание грунта [14].

Полученные зависимости эквивалентного удельного электрического сопротивления безбалластного пути от геоэлектрической структуры пути (рис. 4) дают возможность проанализировать изменение переходного сопротивления на электрифицированных участках железных дорог с безбалластной конструкцией пути [15].

Для расчета потенциала на поверхности земли под осью рельсового пути многослойную землю заменим однородным полупространством с эквивалентным удельным электрическим сопротивлением и получим

$$\Phi_3 \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0 \\ z=0}} = \eta \gamma_2 \rho_{31}^0 I F_3(\gamma_2; \Delta x m; l; r_{\text{эш}}), \quad (24)$$

где x, y, z — координаты точки земли, в которой определяется потенциал; ρ_{31}^0 — неоднородная структура земли, приведенная к однородной эквивалентным удельным электрическим сопротивлением, Ом·м; I — значение стекания тока с элемента F_3 с характеризующими свойствами ($\Delta x m$ — длина стекающего элемента; l — расстояние между влияющими элементами рельса, $r_{\text{эш}}$ — сопротивление элемента).

$$F_3(\gamma_2; \Delta x m; l; r_{\text{эш}}) = a_0 + \frac{a_1}{|\gamma_2|} + \frac{a_2}{|\gamma_2|^2} + a_3 h_n + a_4 h_n^2 \quad \text{при}$$

$$a_0 = 0,91; a_1 = 0,06636; a_2 = -0,01413; a_3 = -0,06171;$$

$$a_4 = 0,0046; 0,1_{\text{км}}^{-1} \leq |\gamma_2| \leq 2_{\text{км}}^{-1}.$$

Исходя из ранее принятых допущений математической модели, найдем относительные значения падения напряжения на шпалах, безбалластном основании, насыпи и земле:

$$r_n = 0,1775 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3 + 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04 \cdot 10^3 = 17,963; \quad (25)$$

$$\Delta U_{\text{шб}} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\text{шб}}}{r_n} = 0,1775 \cdot 10^{-3} \frac{100 \cdot 10^3}{17,963} = 0,988; \quad (26)$$

$$\Delta U_n = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_n}{r_n} = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{1 \cdot 10^3}{17,963} = 0,007; \quad (27)$$

$$\Delta U_3 = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{\rho}{r_n} = 2,2 \cdot 10^{-3} \frac{0,04 \cdot 10^3}{17,963} = 0,005. \quad (28)$$

Значение переходного сопротивления рельсовый путь—земля на основании экспериментального исследования составило $r_n = 17$ Ом·км, расхождение с расчетным значением — 5,4%.

Удельные электрические сопротивления материалов
Specific electrical resistance of materials

Грунт	ρ , Ом·м
Асфальт	300–5 300
Бетон	900–10 000
Вечномерзлый грунт — талый слой (у поверхности летом)	500–1 000
Гравий глинистый, неоднородный	300
Гравий однородный	800
Дресва (мелкий щебень/крупный песок)	5 500
Песок слегка влажный	400–1 500
Песок сухой	1 500–4 200
Щебень мокрый	3 000
Щебень сухой	5 000

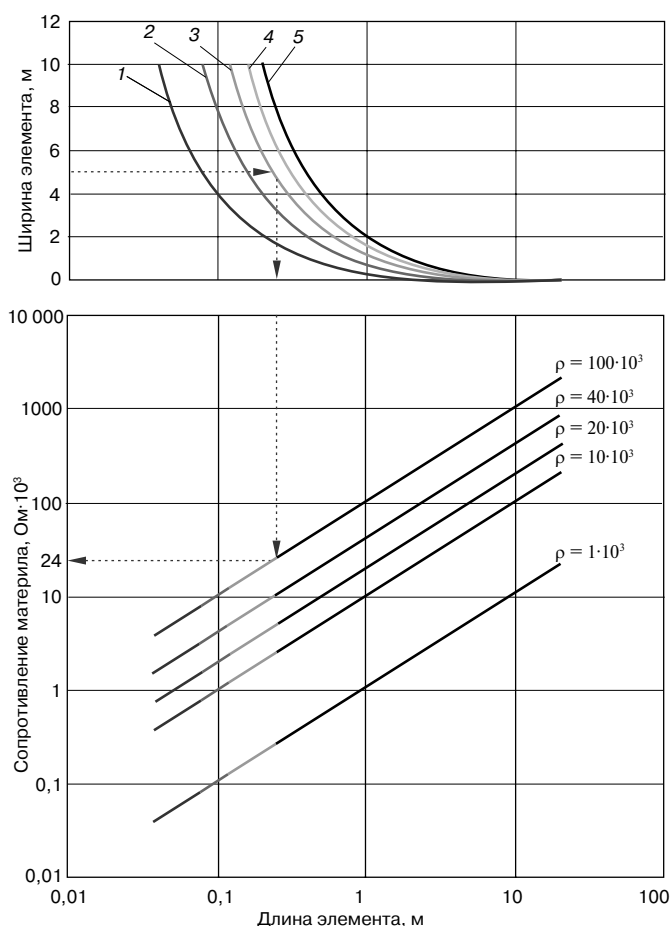


Рис. 4. Зависимость эквивалентного удельного электрического сопротивления безбалластного пути от геоэлектрической структуры пути:
1 — $h_1 = 0,1$; 2 — $h_2 = 0,2$; 3 — $h_3 = 0,3$; 4 — $h_4 = 0,4$; 5 — $h_5 = 0,5$
Fig. 4. Dependence of the equivalent specific electrical resistance of a ballastless track on the geoelectric track structure:
1 — $h_1 = 0,1$; 2 — $h_2 = 0,2$; 3 — $h_3 = 0,3$; 4 — $h_4 = 0,4$; 5 — $h_5 = 0,5$

Заключение. В результате расчетов установлено, что на долю среднего значения показателя удельного электрического сопротивления шпал и безбалластного

основания приходится 80% переходного сопротивления рельсовый путь — земля на участках с безбалластным основанием. Доля удельного электрического сопротивления земли и насыпи под безбалластным путем не превышает 10–20%. Результаты экспериментального исследования показали, что на исследуемом участке переменного тока безбалластного пути переходное сопротивление рельсовый путь — земля одного пути равно 17 Ом·км, что сопоставимо с расчетным значением.

В рамках дальнейшей работы необходимо будет произвести исследования переходного сопротивления безбалластного пути при стекании с рельсов больших токов короткого замыкания. При этом должна быть выполнена имитация короткого замыкания на перегоне вблизи тяговой подстанции и в удалении от тяговой подстанции на n -расстоянии.

На основе проделанного эксперимента можно сделать вывод о правомерности основных исходных предпосылок и допущений в разработанной математической модели переходного сопротивления рельсовый путь — безбалластное основание — земля, а также о значимости величины разности потенциалов составляющих путевой призмы на линиях ВСМ. На основную часть математической модели рельсовый путь — безбалластное основание приходится большая доля падения напряжения. Это говорит о том, что напольные устройства, расположенные на строении безбалластного пути, находятся под существенным потенциалом в момент прохода высокоскоростного поезда.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савин А. В. Опыт укладки и эксплуатации безбалластного пути LVT // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 2. С. 2–8.
2. Савин А. В., Разуваев А. Д. Сферы применения безбалластного пути // Техника железных дорог. 2016. № 3. С. 32–41.
3. Косарев А. Б., Барч А. В., Розенберг Е. Н. Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 6. С. 337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>.
4. Pan Rui, Wu Mingli, Yang Shaobing. Performance of the integrated grounding system of hefei-nanjing passenger dedicated railway [Electronic resource] // 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 6–7 April 2009: [coll. of articles] / IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348003> (access date: 10.12.2021).
5. Finite element calculation of leakage resistance and distributed capacitance of rail to earth in ballastless track [Electronic resource] / Li Teng [et al.] // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, 18–20 July 2013: [coll. of articles]. http://doi.org/10.1007/978-3-642-53751-6_22.
6. Chawla S., Shahu J. T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Numerical analysis // Geotextiles and Geomembranes. 2016. No. 44. P. 344–357.
7. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. 279 с.
8. Михайлов М. И. Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия. М.: Связь-издат, 1959. 583 с.

9. Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.
10. Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.
11. Keller G. V. Dipole method for deep resistivity studies // Geophysics. 1966. Vol. 6, no. 31. P. 1088–1104.
12. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2016 г. № 1327-ст: дата введения 2017-06-01. М.: Стандартинформ, 2016. 92 с.
13. Котельников В. А., Наумов В. А. Обратная тяговая сеть переменного тока при пропуске поездов повышенной массы // Автоматика, телемеханика и связь. 1983. № 4. С. 5–8.
14. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2004. № 7. С. 31–34.
15. Патент на изобретение № 2251495 Российская Федерация, МПК В60М 3/00. Устройство для снижения электромагнитных влияний электрических железных дорог на линии проводной связи: № 2003101577/11: заявл. 20.01.2003; опубл. 10.05.2005 / Косарев А. Б. [и др.]. 5 с.

REFERENCES

1. Savin A. V. Opyt ukladki i ekspluatatsii bezballastnogo puti LVT [Experience in laying and operating a ballastless LVT track]. *Put' i putevye khozyaystvo = Railway Track and Facilities*. 2014;(2):2–8. (In Russ.).
2. Savin A. V., Razuvaev A. D. Sfery primeneniya bezballastnogo puti [Spheres of application of the ballastless track]. *Tekhnika zheleznnykh dorog = Railway technology*. 2016;(3):32–41. (In Russ.).
3. Kosarev A. B., Barch A. V., Rozenberg E. N. Obespechenie elektrobezopasnosti sistem elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog peremennogo toka dlya liniy VSM [Ensuring electrical safety of power supply systems of electrified AC railways for high-speed lines]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2018;77(6):337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>. (In Russ.).
4. Pan Rui, Wu Mingli, Yang Shaobing. Performance of the integrated grounding system of hefei-nanjing passenger dedicated railway. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, April 6–7, 2009: [coll. of articles] / IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5348003> (access date: 10.12.2021).
5. Li Teng, Wu Mingli, He Fan, Song Kejian. Finite element calculation of leakage resistance and distributed capacitance of rail to earth in ballastless track. International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada, July 18–20, 2013: [coll. of articles]. http://doi.org/10.1007/978-3-642-53751-6_22.
6. Chawla S., Shahu J. T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: Numerical analysis. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016;(44):344–357.
7. Karyakin R. N. Tyagovye seti peremennogo toka [Traction networks of AC]. Moscow: Transport Publ.; 1987. 279 p. (In Russ.).
8. Mikhaylov M. I. Vliyaniye vneshnykh elektromagnitnykh poley na tsepi provodnoy svyazi i zashchitnye meropriyatiya [Influence of external electromagnetic fields on wire communication circuits and protective measures]. Moscow: Svyaz'izdat Publ.; 1959. 583 p. (In Russ.).
9. Kosarev B. I. Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. Moscow: Intext Publ.; 2008. 480 p. (In Russ.).
10. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznnykh dorog peremennogo

toka [Electromagnetic processes in power supply systems for AC railways]. Moscow: VMG-Print; 2015. 348 p. (In Russ.).

11. Keller G. V. Dipole method for deep resistivity studies. *Geophysics*. 1966;6(31):1088–1104.

12. GOST 9.602–2016. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i starenia. Sooruzheniya podzemnye. Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii [Unified system of corrosion and ageing protection. Underground constructions. General requirements for corrosion protection], data vvedeniya [introduction date] 2017-06-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. 92 p. (In Russ.).

13. Kotelnikov V.A., Naumov V.A. Obratnaya tyagovaya set' perrmennogo toka pri propuske poezdov povyshennoy massy [Reverse traction network of AC when passing trains of increased mass]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz' = Automation, telemechanics and communication*. 1983;(4):5–8. (In Russ.).

14. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv elektropitaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s tyagovymi setyami [Electromagnetic compatibility of power supply devices for railway automation systems with traction networks]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2004;(7):31–34. (In Russ.).

15. Kosarev A. B., Semenova E. Yu., Getta Yu. N., et al. Ustroystvo dlya snizheniya elektromagnitnykh vliyaniy elektricheskikh zheleznykh dorog na linii provodnoy svyazi [Device for reducing the electromagnetic effects of electric railways on wired communication lines]. Patent No. 2251495 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK B60M 3/00, publ. 10.05.2005. 5 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Борисович КОСАРЕВ, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ, ведущий специалист, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1135363, <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ, заместитель начальника, ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Павел Игоревич СМОЛИН, руководитель проектов, ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 5578-1739, <https://orcid.org/0000-0002-9555-5492>

Илья Алексеевич РЕБРОВ, заместитель директора ЦЭТ, начальник ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, First Deputy General Director of JSC "VNIIZhT", <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Roman A. RUDASHEVSKIY, Leading Specialist, Scientific Center "Electrification and Thermal Power Engineering" (TsET), JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1135363, <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Anna V. RUDASHEVSKAYA, Deputy Head, TsNTKE, JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Pavel I. SMOLIN, Project Manager, TsNTKE, JSC "VNIIZhT", AuthorID: 5578-1739, <https://orcid.org/0000-0002-9555-5492>

Il'ya A. REBROV, Deputy Director of CET, Head of TsNTKE, JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Борисович КОСАРЕВ. Разработка концепции статьи, формулирование целей, задач, структуры подачи материала, формирование заключительной части (40 %).

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ. Выполнение расчета потенциала на поверхности земли под осью рельсового пути, построение математической модели (15 %).

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ. Описание особенностей безбалластной конструкции строения железнодорожного пути, ее преимуществ и областей применения (15 %).

Павел Игоревич СМОЛИН. Методология экспериментального определения переходного сопротивления рельсовый путь — земля, описание практических измерений и параметров (15 %).

Илья Алексеевич РЕБРОВ. Участие в построении математической модели верхнего строения пути, формирование заключительной части (15 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV. Formulation of the article idea, goals, objectives, structure of the presentation of the material, formation of the final part (40 %).

Roman A. RUDASHEVSKIY. Performing the calculation of the potential on the subgrade surface under the axis of the rail track, building a mathematical model (15 %).

Anna V. RUDASHEVSKAYA. Description of the features of the ballastless design of the structure of the railway track, its advantages and areas of application (15 %).

Pavel I. SMOLIN. Methodology for the experimental determination of the rail-to-earth transition resistance, description of practical measurements and parameters (15 %).

Il'ya A. REBROV. Participation in the construction of a mathematical model of the upper structure track, the formation of the final part (15 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 15.12.2021, первая рецензия получена 20.12.2021, вторая рецензия получена 10.01.2022, принята к публикации 02.02.2022.

The article was submitted 15.12.2021, first review received 20.12.2021, second review received 10.01.2022, accepted for publication 02.02.2022.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.316.13:625.141

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22



ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БАЛЛАСТА ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕНЦИАЛА РЕЛЬС — ЗЕМЛЯ НА УЧАСТКАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

А. А. Крылов, И. А. Ребров ✉, А. В. Рудашевская,
Р. А. Рудашевский, Е. Д. Харьковская

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью работы является оценка изменения переходного сопротивления верхнего строения пути при переходе с балластной конструкции пути на безбалластную. Эти изменения оказывают влияние на возникающую разность потенциалов рельс — земля и касаются работы обратной тяговой сети, протекания обратного тягового тока устройств железнодорожной автоматики, обеспечения необходимого уровня электробезопасности эксплуатационного персонала.

Материалы и методы. Авторами использованы как аналитический метод по определению разности потенциалов рельс — земля, так и практический метод на основе проведенных экспериментов по замерам переходного сопротивления железнодорожного полотна. Экспериментальные исследования проводились на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин Дальневосточной железной дороги, который представляет собой участок с тяжеловесным грузовым движением и увеличенным в результате реконструкции верхнего строения пути электрическим сопротивлением путевого балласта.

Результаты. В ходе исследований определены основные критерии возникновения разности потенциалов рельс — земля в работе обратной тяговой сети 2×25 и 25 кВ систем однофазного переменного тока промышленной частоты 50 Гц в зависимости от местоположения исследуемого участка относительно тяговых подстанций, климатических и геологических факторов, грузонапряженности.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты помогут повысить точность определения разности потенциалов рельс — земля в зависимости от указанных факторов, а также от типа верхнего строения пути, его характеристик, электрической схемы питающей сети.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, верхнее строение, безбалластная конструкция пути, тяговое электроснабжение, разность потенциалов рельс — земля, рельсовая цепь, обратная тяговая сеть, устройства автоматики и телемеханики

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

Для цитирования: Крылов А. А., Ребров И. А., Рудашевская А. В., Рудашевский Р. А., Харьковская Е. Д. Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 16–22. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.316.13:625.141

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22



TRANSITION RESISTANCE INFLUENCE OF THE UPPER STRUCTURE TRACK BALLAST ON THE RAIL-TO-EARTH POTENTIAL AT AC RAILWAY SECTIONS

Anton A. Krylov, Il'ya A. Rebrov , Anna V. Rudashevskaya,
Roman A. Rudashevskiy, Elena D. Khar'kovskaya

Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the research is to evaluate transition resistance modifications of the upper structure track in passing from the ballast to the ballastless track. These modifications effect the rail-to-earth potential difference. Moreover, they refer to the reverse traction system, to the reverse traction current of railway automation devices and to the required level of electrical safety guarantee.

Materials and methods. The authors used both the analytical method of the rail-to-earth potential testing and the practical one based on experimental studies of the rail track transition resistance measurements. The authors carried out experiments on the Rozengartovka — Boitsovo — Bikin section of the Far Eastern Railway. This section includes the heavy freight traffic with the increased electric resistance of the track ballast by the upper structure redevelopment.

Results. The research defines the main criteria of the rail-to-earth potential considering the 2×25 and 25 kV reverse traction of monophasic AC systems with the 50 Hz frequency and depending on the experimental area location in terms of traction substations, on the climate and geological factors and on the freight traffic density.

Discussion and conclusion. The obtained results will improve the accuracy of the rail-to-earth potential difference considering not only indicated factors, but also the upper structure type, track features and a feed line scheme for contact wire.

KEYWORDS: railway track, upper structure, ballastless track, traction power supply, rail-to-earth potential difference, track circuit, reverse traction network, automation and telemechanics devices

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

For citation: Krylov A. A., Rebrov I. A., Rudashevskaya A. V., Rudashevskiy R. A., Khar'kovskaya E. D. Transition resistance influence of the upper structure track ballast on the rail-to-earth potential at AC railway sections. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):16–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-16-22>.

Введение. В настоящее время в связи с повышением грузонапряженности железных дорог, увеличением весовых норм, объема перевозимых грузов, преимущественно к портам Дальнего Востока, увеличения осевой нагрузки на железнодорожный путь за счет использования инновационного вагонного парка в ОАО «РЖД» актуальным является вопрос влияния указанных факторов на текущее состояние верхнего строения железнодорожного пути (далее — ВСП), проведения его модернизации и реконструкции [1]. В ОАО «РЖД» разрабатываются и применяются различные инновационные технические и технологические решения по содержанию ВСП, типы конструкций рельсошпальных решеток, а также способы их адаптации к возрастающим нагрузкам. На сегодняшний день Центральной дирекцией по ремонту пути при проведении капитальных ремонтов ВСП используются инновационные технологические решения, например применение безбалластного пути, пенополистирола, пеноплекса и геотекстиля, укрепление балластной призмы различного вида полимерами и т. п. Помимо улучшения механических свойств ВСП происходит существенное изменение электрических параметров рельсовых цепей, таких как электрическое и переходное сопротивление балласта ВСП. Причиной являются изменения пути протекания обратного тягового тока в работе системы тягового электропитания (далее — СТЭ), при этом необходимо учитывать, что режим работы обратной тяговой сети напрямую оказывает влияние на работоспособность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (далее — ЖАТ) [2]. При ненормативном изменении вышеуказанных параметров возникает аварийный режим работы обратной тяговой сети, который приводит к асимметрии обратного тягового тока, появлению мест нагрева в местах установки электрических соединителей рельсовых цепей, выходу из строя путевых дроссель-трансформаторов, нарушению показаний и сбою кодов автоматической локомотивной сигнализации, перекрытию светофоров ЖАТ в пути следования подвижного состава [3, 4]. В результате этого возникают случаи применения экстренных торможений подвижного состава, выхода из строя устройств ЖАТ, увеличиваются задержки поездов, что, в свою очередь, негативно влияет на обеспечение безопасности движения поездов на сети железных дорог. Таким образом, область изучения вопроса изменения электрического и переходного сопротивления балласта ВСП лежит на стыке нескольких хозяйств.

Проведение теоретических и экспериментальных исследований позволит достоверно оценить влияние типа шпал, рельсовых скреплений, накладок, балласта и земляного полотна, входящих в ВСП, на электрические параметры рельсовых цепей, что, в свою

очередь, позволит повысить точность проведения электрических расчетов СТЭ, определения степени влияния на работу устройств ЖАТ по условиям электромагнитной совместимости и обеспечит нормированный уровень электробезопасности эксплуатационного персонала.

В настоящее время при выполнении электрических расчетов СТЭ [5] сопротивление рельсовых цепей принимается без учета удельной проводимости земли, типа шпал, балласта и земляного полотна. Между тем эти параметры для различных регионов РФ в зависимости от климатических и геологических особенностей расположения и различного типа ВСП могут существенно отличаться. Так, при изменении удельной проводимости земли в диапазоне $5 \cdot 10^{-14} \dots 10^{-11}$ ед. $CGSm_0$ реактивное сопротивление рельсовой нити Р65 уменьшается в 1,3 раза. Еще большее влияние на электрические параметры железнодорожного полотна оказывает наличие пеноплекса и геотекстиля на участках бесстыкового железнодорожного пути, которое приводит к существенному увеличению переходного сопротивления рельс — земля.

Экспериментальные исследования переходного сопротивления ВСП и определение потенциала рельс — земля на Дальневосточной железной дороге. Целью экспериментального исследования на участке Розенгартовка — Бойцово — Бикин Дальневосточной железной дороги было определение причины повышенного потенциала рельсовой цепи, выявление последствий воздействия высокого потенциала рельс — земля на устройства тягового электропитания, ЖАТ для участка, электрифицированного по системе тягового электропитания однофазного переменного тока 25 кВ промышленной частоты 50 Гц. Исследование было выполнено в 2017 г. при участии сотрудников научного центра «Электрификация и теплоэнергетика» (далее — ЦЭТ).

Было выявлено, что потенциал рельсовой цепи относительно удаленной земли существенно повышается (см. рис. 1) каждый раз при приближении грузовых поездов к ст. Бойцово. При этом разность потенциалов рельс — земля повышалась до значений 1000–1200 В.

Исследование и оценка причин возникновения нештатных ситуаций в работе обратной тяговой сети в системном взаимодействии с рельсовыми цепями, а также изучение существующих технических решений, направленных на снижение или исключение рисков возникновения критических ситуаций в работе канализации обратного тягового тока (отечественного и зарубежного производства), позволят усовершенствовать имитационную (математическую) модель СТЭ для изучения возможного влияния применяемых схем питания и секционирования на распределение обратного тягового тока

в рельсовой цепи. В результате будут определены технические меры по электробезопасности при производстве работ эксплуатирующими организациями и мероприятия для исключения влияния разности потенциалов между рельсом и землей, возникающей при работе системы тягового электроснабжения, на функционирование объектов обратной тяговой сети. Это должно способствовать полному исключению рисков ОАО «РЖД», которые потенциально могут возникнуть на участках железных дорог с повышенным сопротивлением балласта и(или) земляного полотна из-за нарушений нормальной работы объектов обратной тяговой сети вследствие влияния разности потенциалов между рельсом и землей, возникающей при работе СТЭ.

Проведенные измерения подтвердили:

1) промерзание грунта при изначально повышенном переходном сопротивлении рельс — земля, обусловленном, в свою очередь, проведенным в 2016 г. капитальным ремонтом по четному пути (с применением пенополистирола), значительно снижает протекание обратного тягового тока от ст. Бойцово к тяговой подстанции Розенгартовка по четному пути;

2) уменьшение интервала попутного следования тяжеловесных поездов существенно увеличивает потенциал рельсовой цепи за счет сложения в рельсах обратных тяговых токов от смежно идущих поездов.

Полученные данные могут оказать существенное влияние на результаты электрических расчетов СТЭ, результаты определения пропускной способности [6], расхода и потерь электрической энергии при проектировании и реконструкции электрифицированных участков. Вследствие этого разработка методических рекомендаций, содержащих сведения об электрических параметрах железнодорожного полотна при различных типах рельсов и его конструкции и условиях эксплуатации в разных регионах РФ, является актуальной задачей.

Аналитический расчет потенциала рельс — земля.

Рассмотрим определение потенциала рельс — земля на примере работы системы тягового электроснабжения 2×25 кВ [7] для участков с безбалластным верхним строением пути и заземлением опор, объединенных тросом группового заземления.

Напряжение потенциала рельс — земля определяется по следующей формуле [8]:

$$\dot{U}_3 = \left(1 - \frac{z_{к.р}}{z_p}\right) \left[z_{вр} \left(2I_{ATi} \left(e^{-\gamma|e_{ATi}-x|} - e^{-\gamma x} \right) \right) + z_{вх.р} I_{кз} \left(e^{-\gamma|e_{ATi}-x|} - e^{-\lambda x} \right) \right],$$

где $z_{к.р}$ — удельное сопротивление взаимной индукции между контурами контактная сеть — рельсы, Ом/км;

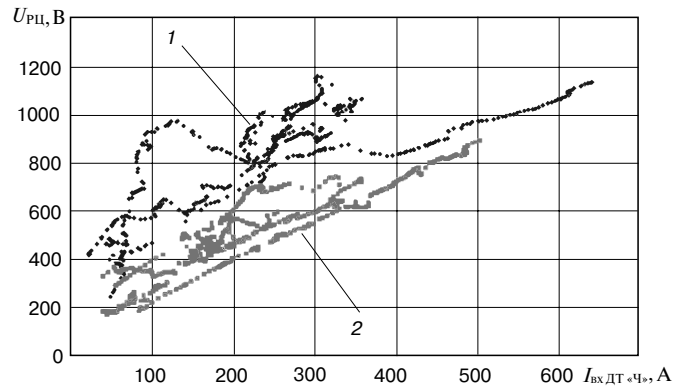


Рис. 1. График зависимости потенциала рельсовых цепей (междупутной перемычки) $U_{ПЦ}$ от суммарного тока в полуобмотках тягового двигателя входного светофора «Ч» (со стороны перегона): 1 — без контура заземления; 2 — с контуром заземления

Fig. 1. Graph of the dependence of the track circuits potential (intertrack-rail jumper) $U_{ПЦ}$ on the total current in the half-windings of the traction motor of the input traffic light «Ч» (from the side of the stage): 1 — without earth loop; 2 — with earth loop

z_p — сопротивление рельсов, Ом; $z_{вр}$ — волновое сопротивление рельсового пути, Ом; I_{ATi} — величина тока, протекающего через автотрансформатор, А; γ — коэффициент распространения рельсового пути, км⁻¹; x — расстояние от места подключения искусственного заземлителя к рельсовому пути, км; $z_{вх.р}$ — входное сопротивление рельсов, Ом; $I_{кз}$ — величина тока в точке короткого замыкания, А.

На величину напряжения потенциала рельс — земля влияют ряд случайных величин, например место короткого замыкания, мощность питающей системы. На рис. 2 приведены значения расчета потенциала рельсов относительно удаленной земли с учетом зависимостей сопротивления автотрансформатора и сопротивления фундаментов опор, а также переходного сопротивления рельс — земля для тяговой сети типа ПБСМ1-70 + МФ-100 + А-185 с рельсами Р65 на железобетонных шпалах при подключении к рельсам искусственного заземлителя и осуществлении двустороннего питания посредством двух однофазных трансформаторов, расположенных на каждой подстанции [9].

В соответствии с полученными графическими зависимостями потенциала рельс — земля можно сделать вывод, что данные напряжения имеют точку максимума в месте короткого замыкания для каждого автотрансформаторного участка. Увеличение количества автотрансформаторов приводит к значительному снижению максимальных значений напряжения рельс — земля. По мере увеличения расстояния между тяговой подстанцией и рассматриваемым участком величина максимального напряжения незначительно снижается. Следует отметить, что характер изменения

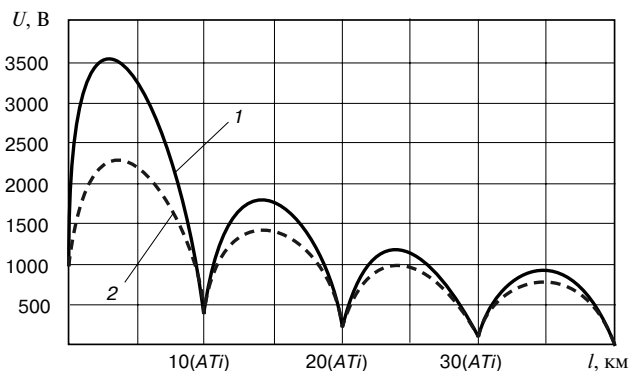


Рис. 2. Результаты расчетов напряжения рельс — земля СТЭ 2×25 кВ при переходном сопротивлении $r_n = 4$ Ом·км:

1 — сопротивление на автотрансформаторе 4,0 Ом;
2 — сопротивление на автотрансформаторе 4,5 Ом

Fig. 2. Calculation results of the rail-to-earth voltage of the 2×25 kV traction power supply system with $r_n = 4$ Ohm·km transition resistance:

1 — resistance of the 4.0 Ohm autotransformer;
2 — resistance of the 4.5 Ohm autotransformer

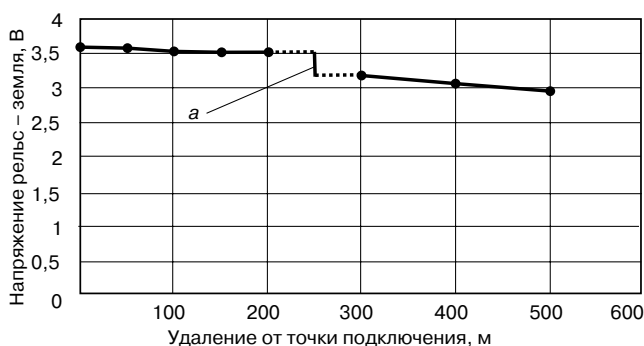


Рис. 3. График изменения напряжения рельс — земля в зависимости от удаления от точки подключения при величине тока 10 А:

a — изменение потенциала в связи с электромагнитной помехой

Fig. 3. Graph of the rail-to-earth voltage change depending on the distance from the connection point at the 10 A current:

a — potential change due to electromagnetic interference

Результаты замеров сопротивлений на контрольных участках
Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»
Results of resistance measurements in the control sections
of JSC “VNIIZhT” Test Loop

Характеристика участка пути	Измеренное сопротивление, Ом	Переходное сопротивление балласта ВСП, Ом/км
Участок с безбалластным ВСП	21	11
Участок с балластным ВСП	19	10

напряжения рельс — земля в точке подключения обмотки автотрансформатора к средней точке ближайшего путевого дроссель-трансформатора зависит от его удаленности от тяговой подстанции.

Результаты измерений потенциала рельса на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». С целью фактического определения величины переходного сопротивления рельс — земля при различных конструкциях ВСП и степени влияния разности потенциалов рельс — земля 17 сентября 2021 г. были проведены опытные замеры на следующих участках Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ», электрифицированных по системе однофазного переменного тока 25 кВ промышленной частоты 50 Гц:

- участок 3-го км 2-го кольцевого пути с безбалластными конструкциями длиной порядка 550 м;
- участок 5-го км 2-го кольцевого пути с балластной щебеночной призмой длиной порядка 500 м.

Общая длина 2-го кольцевого пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» составляет 5700 м.

На рис. 3 показан полученный график распределения потенциала рельса относительно удаленной земли.

Необходимо отметить, что на представленном графике наблюдается скачкообразное изменение потенциала рельса относительно земли. Предположительно, данное изменение связано с изменением электромагнитных условий в зоне проведения измерений, вызванным режимами работы электроподвижного состава на соседнем пути и снижением напряжения помехи.

Согласно экспериментально полученным данным, снижение потенциала рельса относительно удаленной земли на каждые 100 м пути по мере удаления от точки втекания тока в рельс составило $2 \div 4$ %. Электрическое и переходное сопротивление балласта ВСП в точке втекания тока составило 0,36 Ом, что дает величину распределенного переходного сопротивления $7 \div 8$ Ом/км в пересчете на общую длину рельсового пути.

Были произведены аналогичные замеры для каждого из контрольных участков, которые поочередно электрически изолировали от других участков 2-го кольцевого пути Экспериментального кольца следующим образом. На первом участке с установленными безбалластными конструкциями железнодорожного пути были демонтированы стыки с обеих сторон, после чего был произведен замер. Далее на данном участке стыки были восстановлены. Затем проводился демонтаж стыков второго участка с балластной щебеночной призмой, после чего на данном участке был произведен замер (см. таблицу).

Как следует из опытных данных, переходное сопротивление балласта ВСП контрольного участка значительно больше сопротивления электрически соединенных рельсовых цепей 2-го и 3-го кольцевого пути в связи с тем, что их длина более чем в 20 раз превышает длину контрольных участков. Следовательно, замеряемое сопротивление на стыках контрольного участка и соседних путей можно принять

как переходное сопротивление балласта ВСП контрольного участка.

Заключение. 1. Проведенные замеры на участке Розенгартовка—Бойцово—Бикин Дальневосточной железной дороги показывают снижение потенциала рельс—земля на 30–40 % за счет изменения переходного сопротивления рельс—земля путем изменения контура заземления СТЭ. Это говорит о необходимости рассмотрения технических решений, позволяющих снизить потенциал рельс—земля.

2. Величина напряжения рельс—земля рассматриваемой СТЭ 2×25 кВ зависит от линии с сосредоточенными и распределенными параметрами, которые оказывают влияние на электрическое и переходное сопротивление балласта ВСП. Определение параметров позволит повысить точность проведения электрических расчетов СТЭ.

3. На реальном участке безбалластного ВСП возможно и целесообразно использовать искусственный заземлитель на расстоянии не более 2 м от фундамента опор. Допускается его расположение непосредственно в створе расположения опор, где отсутствуют кабельные сети.

4. В результате экспериментального исследования получены значения переходного сопротивления балласта ВСП участков Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ», которые в дальнейшем можно будет использовать при сравнении с численными результатами расчетов переходного сопротивления балласта ВСП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р. 171 с. URL: <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).
2. Патент № 2251495 Российская Федерация, МПК B60M 3/00. Устройство для снижения электромагнитных влияний электрических железных дорог на линии проводной связи: № 2003101577/11: заявл. 20.01.2003; опубл. 10.05.2005 / Косарев А. Б. [и др.]. 5 с.
3. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Электромагнитная совместимость устройств электропитания систем железнодорожной автоматики с тяговыми сетями // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2004. № 7. С. 31–34.
4. Косарев А. Б., Логинов С. В. Повышение надежности работы устройств автоблокировки за счет отказа от использования рельсовых путей для заземления опор контактной сети переменного тока // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2009. № 2. С. 9–14.
5. Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25 апреля 2016 г. № 753р. URL: <http://static.scbist.com/scb/instr/ce191.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).
6. ГОСТ Р 58321—2018. Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Требования к заземлению: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.

7. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах [Электронный ресурс]: утв. распоряжением зам. министра путей сообщения РФ А. Н. Кондратенко от 10 июня 1993 г. № ЦЭ-191. URL: <http://static.scbist.com/scb/instr/ce191.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).

8. Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / А. Б. Косарев [и др.]; под ред. А. Б. Косарева, О. Н. Назарова. М.: РАС, 2018. 118 с.

9. Косарев А. Б., Барч А. В., Розенберг Е. Н. Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 6. С. 337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030: approved by Decree of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r]. 171 p. URL: <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (access date: 10.12.2021). (In Russ.).
2. Kosarev A. B., Semenova E. Yu., Getta Yu. N., et al. Ustroystvo dlya snizheniya elektromagnitnykh vliyaniy elektricheskikh zheleznykh dorog na linii provodnoy svyazi [Device for reducing the electromagnetic effects of electric railways on wired communication lines]. Patent No. 2251495 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK B60M 3/00, publ. 10.05.2005. 5 p. (In Russ.).
3. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv elektropitaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s tyagovymi setyami [Electromagnetic compatibility of power supply devices for railway automation systems with traction networks]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2004;(7):31–34. (In Russ.).
4. Kosarev A. B., Loginov S. V. Povyshenie nadezhnosti raboty ustroystv avtoblokirovki za schet otказа ot ispol'zovaniya rel'sovykh putey dlya zazemleniya opor kontaktnoy seti peremennogo toka [Improving the reliability of auto-blocking devices by eliminating the use of rail tracks for earthing the supports of the AC contact network]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2009;(2):9–14. (In Russ.).
5. Pravila soderzhaniya kontaktnoy seti, pitayushchikh liniy, otsasyvayushchikh liniy, shuntiruyushchikh liniy i liniy elektroperedachi [Rules for the maintenance of the contact network, supply lines, suction lines, shunt lines and power lines: approved by Order of JSC Russian Railways dated April 25, 2016 No. 753r]. URL: <http://static.scbist.com/scb/instr/ce191.pdf> (access date: 10.12.2021). (In Russ.).
6. GOST R 58321—2018. Elektroustanovki sistem tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi peremennogo toka. Trebovaniya k zazemleniyu: nats. standart Rossiyskoy Federatsii [Electrical installations of traction power supply systems for AC railway. Earthing requirements: nat. standard of the Russian Federation], data vvedeniya [introduction date] 2019-07-01. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. 28 p. (In Russ.).
7. Instruksiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh: utv. rasporyazheniem zam. ministra putey soobshcheniya RF A. N. Kondratenko ot 10 iyunya 1993 g. № TsE-191 [Instructions for earthing power supply devices on electrified railways: approved by Order of the deputy Minister of Railways of the Russian Federation A. N. Kondratenko dated June 10, 1993 No. TsE-191]. URL: <http://static.scbist.com/scb/instr/ce191.pdf> (access date: 10.12.2021). (In Russ.).

8. Kosarev A. B., Nazarov O. N., Savin A. V., et al. Nauchnoe soprovozhdenie razvitiya vysokoskorostnykh magistralей v Rossii [Scientific support for the development of high-speed main lines in Russia]. Moscow: RAS Publ.; 2018. 118 p. (In Russ.).

9. Kosarev A. B., Barch A. V., Rozenberg E. N. Obespechenie elektrobezopasnosti sistem elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka dlya liniy VSM [Ensuring electrical safety of power supply systems of electrified AC railways for high-speed lines]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2018;77(6):337–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Александрович КРЫЛОВ,
директор научного центра «Электрификация
и теплоэнергетика» (ЦЭТ), АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Илья Алексеевич РЕБРОВ,
заместитель директора ЦЭТ, начальник ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ»,
AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ,
заместитель начальника, ЦНТКЭ, АО «ВНИИЖТ», AuthorID:
1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ,
ведущий специалист, ЦЭТ, АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Елена Дмитриевна ХАРЬКОВСКАЯ,
ведущий специалист, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1138297, <https://orcid.org/0000-0002-1601-2474>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. KRYLOV,
Director of the Scientific Center “Electrification and Thermal
Power Engineering” (TsET), JSC “VNIIZhT”, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

Il'ya A. REBROV,
Deputy Director of TsET, Head of TsNTKE, JSC “VNIIZhT”,
AuthorID: 1029015, <https://orcid.org/0000-0003-4811-7155>

Anna V. RUDASHEVSKAYA,
Deputy Head, TsNTKE, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1072959, <https://orcid.org/0000-0003-2941-6950>

Roman A. RUDASHEVSKIY,
Leading Specialist, TsET, JSC “VNIIZhT”, <https://orcid.org/0000-0001-6026-2510>

Elena D. KHAR'KOVSKAYA,
Leading Specialist, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1138297, <https://orcid.org/0000-0002-1601-2474>

ВКЛАД АВТОРОВ

Антон Александрович КРЫЛОВ. Формирование концепции
статьи, определение структуры и логики подачи материала,
формирование результирующей части и выводов (20%).

Илья Алексеевич РЕБРОВ. Проведение замеров на участке
сети Дальневосточной железной дороги, описание результатов
измерений и адаптация изложения в структуру статьи (20%).

Анна Владимировна РУДАШЕВСКАЯ. Методология анали-
тического расчета для определения потенциала рельс—зем-
ля на примере работы системы тягового электроснабжения
2×25 кВ (20%).

Роман Андреевич РУДАШЕВСКИЙ. Участие в измерени-
ях величины переходного сопротивления рельс—земля при
различных конструкциях ВСП и определение степени влияния
разности потенциалов рельс—земля на участках Эксперимен-
тального кольца АО «ВНИИЖТ», формирование материала на
основе проведенных измерений (20%).

Елена Дмитриевна ХАРЬКОВСКАЯ. Участие в измерениях ве-
личины переходного сопротивления рельс—земля при различ-
ных конструкциях ВСП на участках Экспериментального кольца
АО «ВНИИЖТ», описание проведенного эксперимента (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anton A. KRYLOV. Formation of the concept of the article, de-
termination of the structure and logic of the presentation of the ma-
terial, formation of the resulting part and conclusions (20%).

Il'ya A. REBROV. Carrying out measurements on a section of
the network of the Far Eastern Railway, describing the measure-
ment results and adapting the presentation to the structure of
the article (20%).

Anna V. RUDASHEVSKAYA. Analytical calculation methodo-
logy for determining the rail-to-earth potential on the example of
the operation of a 2×25 kV traction power supply system (20%).

Roman A. RUDASHEVSKIY. Participation in measurements of
the rail-to-earth transition resistance for various VSP designs and
determination of the degree of influence of the rail-to-earth po-
tential difference in the sections of JSC “VNIIZhT” Test Loop, forma-
tion of material based on the measurements (20%).

Elena D. KHAR'KOVSKAYA. Participation in measurements of
the rail-to-earth transition resistance for various VSP designs in
the sections of JSC “VNIIZhT” Test Loop, description of the expe-
riment (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант
рукописи.*

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 17.12.2021, первая рецензия получена
11.01.2022, вторая рецензия получена 14.01.2022, принята к публи-
кации 20.01.2022.

The article was submitted 17.12.2021, first review received 11.01.2022,
second review received 14.01.2022, accepted for publication 20.01.2022.

Научная статья

УДК 621.313.333

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев ✉, В. К. Духовников, А. В. Гуляев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие силовой полупроводниковой техники и технологии послужило основой для внедрения на подвижном составе электрифицированных железных дорог принципиально новых типов частотно-регулируемых электроприводов с тяговыми асинхронными двигателями. В этой связи приобретают актуальность задачи теоретического и экспериментального исследования режимов работы таких приводов. Данная публикация является продолжением темы управления асинхронными машинами электровоза переменного тока, затронутой в № 5 журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» в 2021 г.

Материалы и методы. Для анализа работы преобразователей частоты широко применяются методы математического моделирования, позволяющие оценить работу двигателя в различных режимах, не прибегая к трудоемким натурным испытаниям. В последнее время разработаны пакеты программ для визуального программирования, предназначенные главным образом для отечественных пользователей, которые не уступают по своим возможностям ведущим зарубежным аналогам. К числу таких программных продуктов относится программное обеспечение для моделирования технических систем SimInTech, разработанное компанией «ЗВ Сервис». Программное обеспечение ориентировано на решение различных прикладных задач, в частности на моделирование системы векторного управления асинхронным приводом.

Результаты. С помощью пакета прикладных программ SimInTech разработана математическая модель асинхронного привода вспомогательных машин электровоза во вращающейся системе координат $d-q$ с учетом взаимного влияния каналов управления d и q , представлены результаты имитационного моделирования.

Обсуждение и заключение. Разработанный комплекс из асинхронного двигателя и системы векторного управления позволяет отрабатывать различные алгоритмы повышения энергоэффективности работы асинхронных вспомогательных машин электровоза путем применения предложенного алгоритма выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. Представленная структура векторного управления позволяет реализовать ее на базе современных микроконтроллеров, способствуя сокращению времени программирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, вспомогательный привод, асинхронный электродвигатель, векторное управление, SimInTech, имитационное моделирование

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

Для цитирования: Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Духовников В. К., Гуляев А. В. Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.313.333

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30



MODELING VECTOR CONTROL OF THE ASYNCHRONOUS DRIVE OF ELECTRIC ROLLING STOCK AUXILIARY MACHINES

Yuriy M. Kulinich, Sergey A. Shukharev ✉,
Vyacheslav K. Dukhovnikov, Alexander V. Gulyaev

Far Eastern State University of Transport (DVGUPS),
Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of power semiconductor devices and technology served the basis for fundamentally new types of frequency-controlled electric drives with traction asynchronous motors on the rolling stock of electrified railways. Therefore, problems of theoretical and experimental study of the operating modes of the mentioned drives become actual. This article is a theme continuation of the asynchronous machines control on the AC locomotive, which was presented in no. 5 of Russian Railway Scientific Journal in 2021.

Materials and methods. For analysing the frequency converter operation, the authors used mathematical modeling methods, which allowed evaluating the motor operation in various modes without resorting to time-consuming full-scale tests. Recently, software packages for visual programming have been developed, aimed mainly at domestic users, which are not inferior in their capabilities to leading foreign counterparts. Among such software products is SimInTech software for modeling technical systems, developed by 3V Service. The software focuses on solving various applied problems, particularly, on modeling a vector control system for an asynchronous drive.

Results. The authors developed a mathematical model of an asynchronous drive of auxiliary machines of an electric locomotive in a rotating coordinate system $d-q$ by the SimInTech application package and concerning the cross-impact influence of d and q control channels.

Discussion and conclusion. The developed complex of an asynchronous motor and a vector control system enable to work out various algorithms for improving the energy efficiency of the operation of asynchronous auxiliary machines of an electric locomotive by applying the proposed algorithm for choosing the optimal value of the rotor flux linkage. The presented vector control structure also enables to implement it on the basis of modern microcontrollers, helping to reduce programming time.

KEYWORDS: AC locomotive, auxiliary drive, asynchronous electric motor, vector control, SimInTech, simulation modeling

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

For citation: Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Dukhovnikov V. K., Gulyaev A. V. Modeling vector control of the asynchronous drive of electric rolling stock auxiliary machines. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):23–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-23-30>.

Введение. Вопросам внедрения систем управления асинхронными двигателями в промышленности и на транспорте посвящен ряд работ отечественных ученых [1–4]. Основные принципы частотного (скалярного) управления асинхронным двигателем изложены в работе М. П. Костенко [5]. Методы управления асинхронным двигателем, уравнения которых представлены в векторной форме, ориентированной по направлению потокосцепления ротора (FOC — field oriented control), впервые сформулированы в 1971 г. Ф. Блашке (F. Blaschke) [6]. Электромагнитные процессы в двигателе описываются в системе координат $d-q$, вращающейся синхронно с магнитным полем двигателя. При этом система координат $d-q$ является ортогональной, т. е. с помощью продольной составляющей тока статора I_{sd} можно независимо управлять потокосцеплением ротора ψ_R , а поперечная составляющая тока статора I_{sq} однозначно определяет угловую скорость вращения ротора двигателя ω .

В [7] представлена имитационная модель асинхронного двигателя в системе координат $d-q$, на базе которой исследована возможность повышения энергетической эффективности векторного управления асинхронным двигателем вспомогательных машин за счет выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. Новизна выбранного подхода к решению задачи энергосбережения подтверждена положительным решением о выдаче патента от 30.11.2021 по заявке № 2021121608.

Целью исследования является разработка структуры векторного управления асинхронным двигателем на базе отечественного программного продукта SimInTech [8]. Это позволит обрабатывать различные алгоритмы для повышения энергоэффективности работы вспомогательных машин электроподвижного состава.

Уравнения асинхронного двигателя во вращающейся системе координат $d-q$. Из уравнений электрического равновесия статора и ротора обобщенной электрической машины, принимая напряжение короткозамкнутого ротора $U_R = 0$, можно получить систему уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В системе координат $d-q$, вращающейся с угловой скоростью ω , уравнения для проекций напряжения статора на оси координат d и q принимают вид [7, 9, 10]:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= I_{sd} R_S + L_{\Sigma} \frac{dI_{sd}}{dt} - I_{sq} \omega L_{\Sigma} + K_2 \frac{d\psi_R}{dt}; \\ U_{sq} &= I_{sq} R_S + L_{\Sigma} \frac{dI_{sq}}{dt} + I_{sd} \omega L_{\Sigma} + \omega K_2 \psi_R, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_S — активное сопротивление обмотки статора; L_{Σ} — общая индуктивность рассеяния статора, $L_{\Sigma} = L_S (1 - K_1 K_2)$; K_1 и K_2 — коэффициенты электро-

магнитной связи статора и ротора соответственно, $K_1 = L_m / L_S$, $K_2 = L_m / L'_R$ (L_m — индуктивность намагничивания; L_S — индуктивность статора; L'_R — индуктивность ротора, приведенная к статору).

Потокосцеплению ротора соответствует выражение

$$\frac{d\psi_R}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m I_{sd} - \psi_R), \quad (2)$$

где T_R — постоянная времени обмотки ротора, $T_R = L'_R / R'_R$ (R'_R — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору).

Электромагнитный момент M_{em} , развиваемый двигателем, рассчитывается в соответствии с формулой

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p K_2 \psi_R I_{sq}, \quad (3)$$

где z_p — число пар полюсов двигателя.

Уравнение электромеханического равновесия двигателя имеет вид

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где M_c — момент сопротивления на валу двигателя; J — момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Из анализа системы уравнений (1) следует, что эти уравнения с перекрестными связями по координатным осям d и q , т. е. управление по координате тока I_{sd} зависит от тока I_{sq} и наоборот. Из-за этого между каналами регулирования составляющих тока статора происходит взаимовлияние, ухудшающее процесс регулирования. Для построения ортогональной (независимой по осям) системы управления двигателем необходимо компенсировать взаимное влияние друг на друга составляющих токов и внутренних ЭДС по осям d и q . В этом случае изменение одной из проекций тока статора (I_{sd} или I_{sq}) не будет оказывать влияние на другую, и управление электромагнитным моментом M_{em} и потокосцеплением ротора ψ_R будет производиться независимо по двум каналам управления. Для осуществления такого управления следует компенсировать в каждом из уравнений системы (1) два последних составляющих напряжения с противоположными индексами. Выражения для напряжений компенсации по осям d и q при этом принимают вид

$$\begin{aligned} \Delta U_{sd} &= -I_{sq} \omega L_{\Sigma} + K_2 \frac{d\psi_R}{dt}; \\ \Delta U_{sq} &= I_{sd} \omega L_{\Sigma} + \omega K_2 \psi_R. \end{aligned} \quad (5)$$

Имитационное моделирование. На рис. 1 представлена структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем, реализованная в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

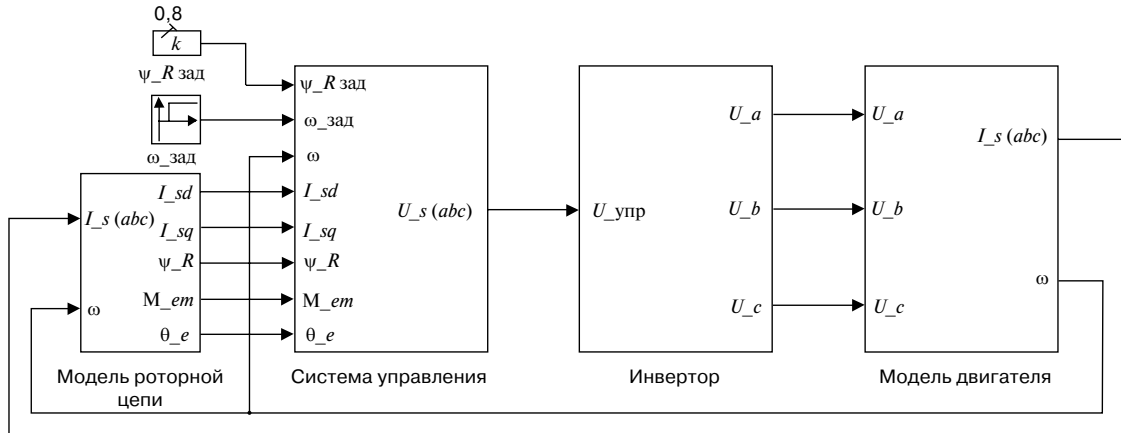


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем в среде SimInTech: I_{sd} , I_{sq} — продольная и поперечная составляющие тока статора соответственно; M_{em} — электромагнитный момент; θ_e — фазный угол; ψ_R — потокосцепление ротора; $\psi_{R\text{ зад}}$ — заданное потокосцепление ротора; ω — угловая скорость вращения ротора; $\omega_{\text{зад}}$ — заданная угловая скорость вращения ротора; $I_{s(abc)}$ — фазные токи статора; $U_{s(abc)}$ — выходные управляющие напряжения; $U_{\text{упр}}$ — входное управляющее напряжение

Fig. 1. Block diagram of a vector control system for an asynchronous motor in the SimInTech program: I_{sd} , I_{sq} — longitudinal and transverse components of the stator current, respectively; M_{em} — electromagnetic moment; θ_e — phase angle; ψ_R — rotor flux linkage; $\psi_{R\text{ зад}}$ — selected rotor flux linkage; ω — angular speed of the rotor rotation; $\omega_{\text{зад}}$ — selected angular speed of the rotor rotation; $I_{s(abc)}$ — stator phase currents; $U_{s(abc)}$ — output control voltage; $U_{\text{упр}}$ — input control voltage

Структурная схема представлена блоками «Модель двигателя», «Инвертор», «Система управления» и «Модель роторной цепи». В основу блока «Модель двигателя» положена модель асинхронного двигателя [7]. Прототипом модели является асинхронный двигатель НВА-55 мотор-вентилятора электровоза, имеющий следующие показатели [11] (см. таблицу).

Блок «Инвертор» представляет собой трехфазный автономный инвертор напряжения, выходные напряжения которого U_a , U_b и U_c сформированы методом широтно-импульсной модуляции [12] по синусоидальному закону с частотой модуляции 2 кГц.

Блок «Модель роторной цепи» предназначен для вычисления положения фазного угла θ_e потокосцепления ротора по величине угловой скорости вращения ротора ω в соответствии с выражением

$$\theta_e = z_p \theta_R + \frac{L_m}{\psi_R T_R} \int I_{sq} dt, \quad (6)$$

где θ_R — угол поворота ротора.

Кроме этого, в блоке «Модель роторной цепи» происходит преобразование токов статора $I_{s(abc)}$ из неподвижной трехфазной системы координат $a-b-c$ во вращающуюся систему $d-q$. При этом преобразование происходит в два этапа: из неподвижной трехфазной системы координат $a-b-c$ в неподвижную декартову $\alpha-\beta$ с помощью преобразования [13]. Далее токи статора из неподвижной декартовой системы координат $\alpha-\beta$ преобразуются в токи вращающейся декартовой системы координат $d-q$ с помощью преобразо-

вания Парка [14]. Сигналы потокосцепления ротора ψ_R и электромагнитного момента M_{em} на выходе блока формируются в соответствии с уравнениями (2) и (3).

Блок «Система управления» (рис. 2) представляет собой двухконтурную схему подчиненного регулирования по потокосцеплению ротора ψ_R и угловой скорости вращения ротора ω . Внешние контуры регулирования по ψ_R и ω формируют заданные значения токов $I_{sd\text{ зад}}$ и $I_{sq\text{ зад}}$ для внутренних контуров по соответствующим осям d и q . Внутренние контуры тока реализуют заданные значения этих токов.

Каждый из указанных контуров регулирования представляет собой регулятор по рассогласованию (ошибке). На его вход поступают сигналы заданного и фактического значения регулируемого параметра. Регулятор формирует управляющее воздействие, сводящее к нулю разность этих входных сигналов. В верхней части рис. 2 представлен регулятор потокосцепления РП, в нижней части рисунка — регулятор угловой скорости вращения РС. Исходными сигналами для этих каналов регулирования являются заданные значения потокосцепления ротора $\psi_{R\text{ зад}}$ и угловой скорости вращения ротора $\omega_{\text{зад}}$.

Во внешнем контуре регулятора потокосцепления с помощью элемента сравнения ЭС2 сравнивается заданное $\psi_{R\text{ зад}}$ и фактическое ψ_R значение потокосцепления ротора. По сигналу рассогласования $\Delta\psi_R = \psi_{R\text{ зад}} - \psi_R$ регулятор потокосцепления формирует заданное значение сигнала тока статора $I_{sd\text{ зад}}$ по оси d для внутреннего контура регулятора тока.

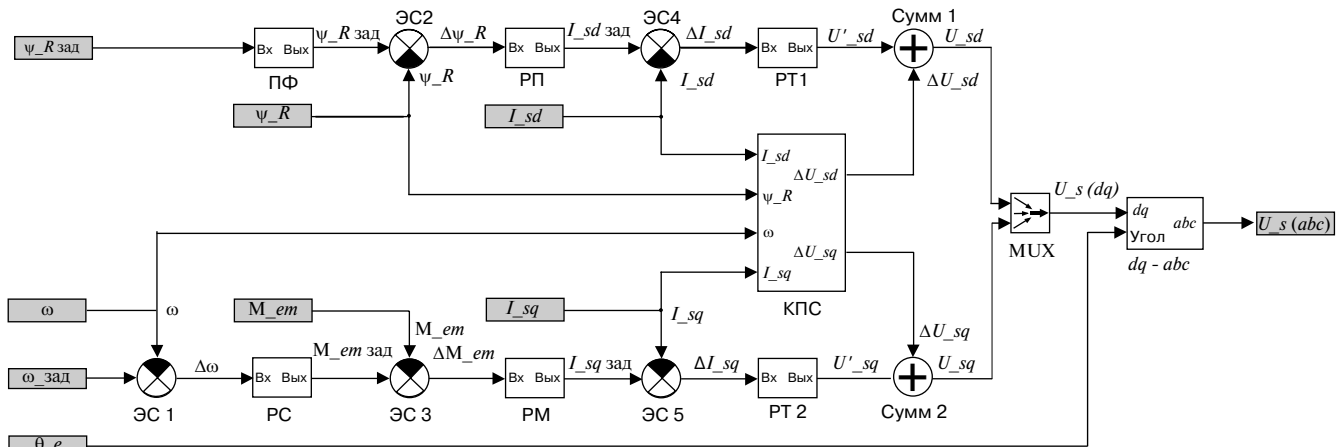


Рис. 2. Структурная схема блока «Система управления»:

ЭС1–ЭС5 — элементы сравнения; Сумм1, Сумм2 — сумматоры; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 — блоки передаточной функции; КПС — блок компенсатора перекрестных связей; MUX — мультиплексор; $dq-abc$ — координатный преобразователь

Fig. 2. Block diagram of the “Control system” unit:

ЭС1–ЭС5 — comparison elements; Сумм1, Сумм2 — adders; ПФ, РС, РП, РМ, РТ1, РТ2 — transfer function blocks; КПС — block of the cross connections compensator; MUX — multiplexer; $dq-abc$ — coordinate transducer

Во внутреннем контуре регулятора тока по оси d , состоящем из элемента сравнения ЭС4 и регулятора тока РТ1, формируется управляющее воздействие U'_{sd} . На входе ЭС4 сравнивается заданное $I_{sd\text{зад}}$ и фактическое значение I_{sd} тока статора по оси d . По сигналу рассогласования $\Delta I_{sd} = I_{sd\text{зад}} - I_{sd}$ регулятор тока РТ1 формирует управляющее воздействие U'_{sd} . Блок передаточной функции ПФ предназначен для плавного нарастания заданного значения потокоцепления ротора.

Аналогично работает канал регулирования угловой скорости вращения ротора. С помощью элемента сравнения ЭС1 происходит сравнение заданной $\omega_{\text{зад}}$ и фактической ω скорости вращения ротора. На выходе регулятора скорости РС по сигналу рассогласования $\Delta\omega$ формируется сигнал заданного значения электромагнитного момента $M_{em\text{зад}}$ для контура регулирования момента. На входе элемента сравнения ЭС3 сравнивается заданное $M_{em\text{зад}}$ и фактическое значение M_{em} электромагнитного момента. Регулятор момента РМ формирует заданное значение сигнала тока статора по оси q для внутреннего контура регулятора тока. Во внутреннем контуре регулятора тока по оси q , состоящем из элемента сравнения ЭС5 и регулятора тока РТ2, формируется управляющее воздействие U'_{sq} .

Блок компенсатора перекрестных связей КПС в соответствии с выражением (5) формирует компенсирующие напряжения ΔU_{sd} и ΔU_{sq} по осям d и q , которые с помощью соответствующих сумматоров Сумм1 и Сумм2 складываются с выходными сигналами управления по каналам потокоцепления U'_{sd} и угловой скорости ротора U'_{sq} . Эти сигналы через мультиплексор MUX поступают на вход координатного

преобразователя $dq-abc$, в котором по сигналу положения фазного угла θ_e происходит преобразование управляющих сигналов из вращающейся декартовой системы координат $d-q$ в неподвижную трехфазную $a-b-c$ с помощью обратных преобразований [13, 14]. В соответствии с выходными сигналами $U_{s(abc)}$ блока

Конструктивные показатели асинхронного двигателя НВА-55 Structural features of HBA-55 asynchronous motor

Наименование показателя, размерность	Обозначение	Значение
Номинальная мощность на валу двигателя, кВт	$P_{2н}$	55
Линейное напряжение статора, В	$U_{л}$	380
Номинальное значение КПД, %	η_n	90,2
Номинальное значение $\cos\varphi$	$\cos\varphi_n$	0,82
Номинальное скольжение, %	s_n	4
Число пар полюсов	z_p	2
Номинальная частота вращения, 1/с	n_n	1440
Номинальная угловая скорость, рад/с	ω_n	150,79
Номинальный момент, Н·м	M_n	364,73
Сопrotивление обмотки статора, Ом	R_s	0,0429
Сопrotивление обмотки ротора (приведенное), Ом	R'_R	0,0875
Индуктивность намагничивания, Гн	L_m	0,0109817
Индуктивность статора, Гн	L_s	0,0113955
Индуктивность ротора (приведенное), Гн	L'_R	0,0113700
Общая индуктивность рассеяния статора, Гн	$L_{\text{эkv}}$	0,000788839

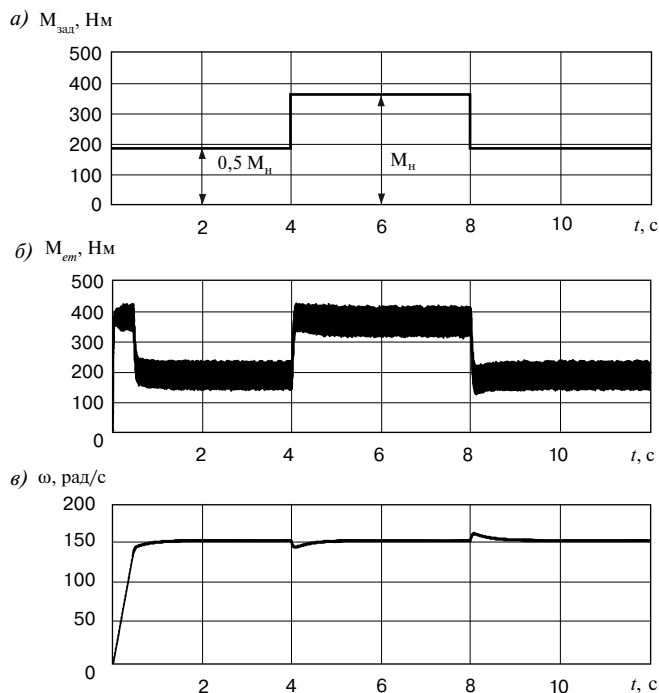


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования системы векторного управления асинхронным двигателем:

a — заданный момент $M_{\text{зад}}$; *б* — электромагнитный момент $M_{\text{ем}}$; *в* — угловая скорость вращения ротора ω

Fig. 3. Results of simulation modeling of a vector control system for an asynchronous motor:
a — selected moment $M_{\text{зад}}$; *b* — electromagnetic moment $M_{\text{ем}}$; *c* — angular speed of the rotor rotation ω

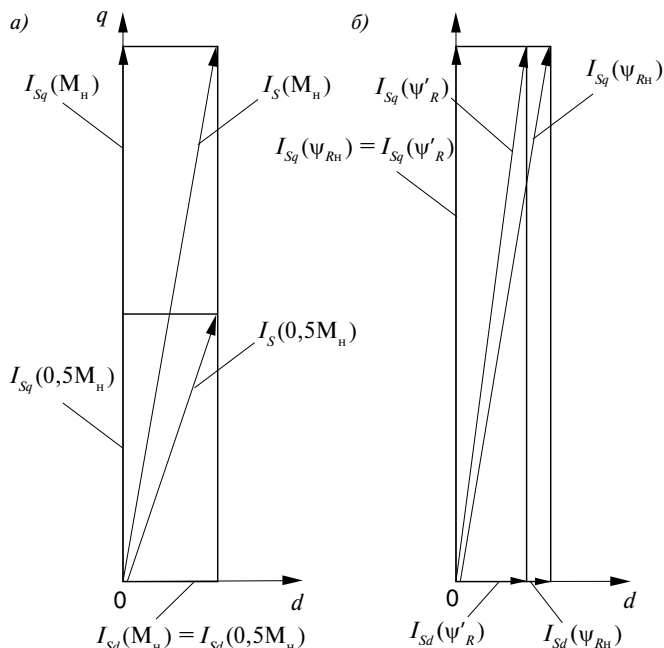


Рис. 4. Векторные диаграммы управления асинхронным двигателем:

a — при изменении электромагнитного момента $M_{\text{ем}}$;
б — при изменении потокосцепления ротора ψ_R
 Fig. 4. Vector diagrams for controlling an asynchronous motor:
a — at the electromagnetic torque $M_{\text{ем}}$ change;
b — at the rotor flux linkage ψ_R change

системы управления происходит формирование выходных сигналов инвертора.

При моделировании любой системы регулирования значительные затраты времени связаны с настройкой регуляторов, поскольку их коэффициенты подбираются преимущественно эмпирическим путем. Элемент «Оптимизатор» в среде SimInTech позволяет автоматизировать процесс настройки регуляторов по времени переходного процесса и величине перерегулирования, сокращая при этом время проектирования. При помощи элемента «Оптимизатор» были настроены все имеющиеся регуляторы: РС, РП, РМ, РТ1 и РТ2.

Результаты моделирования. На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования системы векторного управления асинхронным двигателем.

Моделирование проводилось при двух значениях заданного момента: $M_{\text{зад}} = M_n$ и $M_{\text{зад}} = 0.5 M_n$ (рис. 3, *a*). Из рис. 3, *б* следует, что развиваемое двигателем значение электромагнитного момента $M_{\text{ем}}$ соответствует заданному. Пульсации в форме сигнала $M_{\text{ем}}$ связаны с работой инвертора. На рис. 3, *в* представлена диаграмма угловой скорости вращения ротора, которая наглядно показывает, что система векторного управления поддерживает заданное значение угловой скорости ротора $\omega_{\text{зад}} = 150,79$ рад/с независимо от развиваемого двигателем электромагнитного момента.

На рис. 4 показаны векторные диаграммы системы управления асинхронным двигателем, полученные в результате имитационного моделирования.

Векторные диаграммы соответствуют работе электропривода при изменении одного из задающих воздействий: электромагнитного момента на валу двигателя (рис. 4, *a*) и потокосцепления ротора (рис. 4, *б*).

Из рис. 4, *a* следует, что увеличение момента нагрузки от $0.5 M_n$ до M_n приводит к увеличению тока статора. При этом изменяется только составляющая тока статора I_{sq} по оси q , проекция тока I_{sd} на ось d остается неизменной.

Уменьшение величины потокосцепления от номинального значения ψ_{Rn} до некоторой величины ψ'_R (рис. 4, *б*) вызывает уменьшение проекции тока статора I_{sd} на ось d , другая составляющая тока I_{sq} в проекции на ось q при этом не изменяется.

Из рис. 4 следует вывод о том, что регулирование величины момента и потокосцепления при векторном управлении происходит независимо друг от друга. Величина электромагнитного момента определяется составляющей тока статора I_{sq} по оси q , а величина потокосцепления зависит только от составляющей тока статора I_{sd} по оси d вращающейся декартовой системы координат $d-q$.

Заключение. Разработанная структура векторного управления асинхронным двигателем позволя-

ет обрабатывать различные алгоритмы повышения энергоэффективности работы вспомогательных машин электровоза путем применения предложенного алгоритма выбора оптимальной величины потокосцепления ротора. При этом в соответствии со стратегией импортозамещения используется отечественная среда для моделирования технических систем SimInTech. При моделировании во вращающейся системе координат $d-q$ учтено взаимное влияние каналов управления друг на друга и скомпенсировано влияние составляющих тока статора I_{sd} и I_{sq} . Представленная структура управления позволяет реализовать ее на базе современных микроконтроллеров, способствуя сокращению времени программирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем // *Электротехника*. 2016. № 9. С. 44–50.
2. Ключников А. Т., Турпак А. М. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчете в комплексной форме // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 33. С. 160–176.
3. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Пугачев А. А. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь // *Электротехника*. 2012. № 12. С. 26–31.
4. Шонин О. Б., Пронько В. С. Энергосберегающие алгоритмы частотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // *Записки Горного института*. 2016. Т. 218. С. 270–280.
5. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. Л.: Госэнергоиздат, 1949. 708 с.
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen (in German) // *Siemens-Zeitschrift*. 1971. 10/45. S. 757–760.
7. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Гуляев А. В. Повышение энергетической эффективности вспомогательных машин электровоза переменного тока // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2021. Т. 80, № 5. С. 276–284. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>.
8. Калачёв Ю. Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. М.: ДМК Пресс, 2019. 98 с.
9. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
10. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учеб. пособие / А. А. Андриященко [и др.]. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. 413 с.
11. Пустоветов М. Моделирование асинхронных вспомогательных машин электровозов. Дюссельдорф: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 177 с.
12. Кулинич Ю. М. Электронная преобразовательная техника: учеб. пособие. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. 204 с.
13. Clarke E. Circuit Analysis of AC Power Systems. New York: John Wiley & Sons, 1943. Vol. 1. 540 p.
14. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015. Vol. 5, no. 3. P. 366–373.

REFERENCES

1. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Pugachev A. A. Sistemy skalyarnogo upravleniya tyagovym asinkhronnym dvigatelem [Systems of scalar control of a traction asynchronous motor]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2016;(9):44–50. (In Russ.).
2. Klyuchnikov A. T., Turpak A. M. Bezdatchikovoe vektornoe upravlenie asinkhronnym dvigatelem pri raschete v kompleksnoy forme [Sensorless vector control of an asynchronous motor when calculating in a complex form]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrotechnics, informational technologies, control systems*. 2020;(33):160–176. (In Russ.).
3. Kosmodamianskiy A. S., Vorob'ev V. I., Pugachev A. A. Modelirovanie elektropivoda s asinkhronnym dvigatelem v rezhime minimuma moshchnosti poter' [Modeling of an electric drive with an asynchronous motor in the mode of minimum power loss]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2012;(12):26–31. (In Russ.).
4. Shonin O. B., Pron'ko V. S. Energoberegayushchie algoritmy chastotnogo upravleniya asinkhronnym privodom s utocnieniem oblasti minimuma poter' na osnove metodov nechetkoy logiki [Energy-saving algorithms for frequency control of an asynchronous drive with specification of the area of minimum losses based on fuzzy logic methods]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;(218):270–280. (In Russ.).
5. Kostenko M. P. Elektricheskie mashiny. Spetsial'naya chast' [Electrical Machines. Special part]. Leningrad: Gosenergoizdat Publ.; 1949. 708 p. (In Russ.).
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen (in German). *Siemens-Zeitschrift*. 1971;10(45):757–760.
7. Kulinich Yu. M., Shukharev S. A., Gulyaev A. V. Povysenie energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nykh mashin elektrovoza perezmennogo toka [Increasing the energy efficiency of auxiliary machines of AC electric locomotive]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2021;80(5):276–284. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-5-276-284>. (In Russ.).
8. Kalachev Yu. N. SimInTech: modelirovanie v elektropivode [SimInTech: simulation in the electric drive]. Moscow: DMK Press; 2019. 98 p. (In Russ.).
9. Usol'tsev A. A. Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigatelyami: ucheb. posobie [Frequency control of asynchronous motors: Tutorial]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ.; 2006. 94 p. (In Russ.).
10. Andriyushchenko A. A., Babkov Yu. V., Zarifyan A. A., et al. Asinkhronnyy tyagovyy privod lokomotivov: ucheb. posobie [Asynchronous traction drive of locomotives: Tutorial]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2013. 413 p. (In Russ.).
11. Pustovetov M. Modelirovanie asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov [Modeling of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives]. Dusseldorf: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2016. 177 p. (In Russ.).
12. Kulinich Yu. M. Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie [Electronic converting technology: Tutorial]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2015. 204 p. (In Russ.).
13. Clarke E. Circuit Analysis of AC Power Systems. New York: John Wiley & Sons; 1943. Vol. 1. 540 p.
14. Pradeep J., Devanathan R. Adoption of Park's Transformation for Inverter Fed Drive. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2015;5(3):366–373.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Михайлович КУЛИНИЧ,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 616256, <https://orcid.org/0000-0002-8060-3754>

Александр Викторович ГУЛЯЕВ,

доцент, кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВО «ДВГУПС», AuthorID: 718358, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 360696, <https://orcid.org/0000-0002-7725-8152>

Sergey A. SHUKHAREV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 889967, <https://orcid.org/0000-0001-7856-6651>

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department "Railway Transport", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 616256, <https://orcid.org/0000-0002-8060-3754>

Alexander V. GULYAEV,

Associate Professor, Department "Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics", FGBOU VO "DVGUPS", AuthorID: 718358, <https://orcid.org/0000-0001-7412-3298>

ВКЛАД АВТОРОВ

Юрий Михайлович КУЛИНИЧ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, анализ результатов (30%).

Сергей Анатольевич ШУХАРЕВ. Имитационное моделирование (30%).

Вячеслав Константинович ДУХОВНИКОВ. Вывод уравнений асинхронного двигателя во вращающейся системе координат (30%).

Александр Викторович ГУЛЯЕВ. Обзор систем векторного управления асинхронным приводом (10%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH. Formation of research direction, formulation of goals and objectives, analysis of results (30%).

Sergey A. SHUKHAREV. Simulation modeling (30%).

Vyacheslav K. DUHOVNIKOV. Derivation of the equations of an asynchronous motor in a rotating coordinate system (30%).

Alexander V. GULYAEV. Overview of vector control systems for asynchronous drives (10%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 01.02.2022, первая рецензия получена 03.02.2022, вторая рецензия получена 08.02.2022, принята к публикации 14.02.2022.

The article was submitted 01.02.2022, first review received 03.02.2022, second review received 08.02.2022, accepted for publication 14.02.2022.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

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

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

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

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

Научная статья

УДК 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37



О РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОВОЗЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ОДНОФАЗНЫМ ОБРАТИМЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

В. А. Кучумов, И. Н. НикончукНаучно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализируется еще не решенная проблема реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения.

Материалы и методы. Рассмотрены теоретически возможные варианты работы однофазных обратимых преобразователей напряжения при рекуперативном торможении, при которых: 1) реактивная составляющая тока электровоза имеет емкостной характер, и действующий ток электровоза опережает его реактивную составляющую; 2) реактивная составляющая тока электровоза имеет индуктивный характер, и действующий ток электровоза опережает его активную составляющую. Показано, что первый из рассматриваемых вариантов работы однофазных обратимых преобразователей напряжения является лишь теоретически возможным, так как рекуперация тока в контактную сеть может быть осуществлена при очень малом напряжении в контактной сети, существенно меньшем наименьшего напряжения на токоприемнике. Второй из предложенных вариантов технически осуществим при отставании основной гармоники тока электровоза на угол, превышающий 90 эл. град., но заметно меньший 180 эл. град. Рекуперативное торможение с коэффициентом мощности, близким к единице, возможно лишь теоретически, а практически может быть реализован коэффициент мощности на уровне 0,8...0,9. Тангенс угла между действующим током и его активной составляющей должен быть больше (для некоторого запаса) частного от деления активного на индуктивное сопротивление тяговой сети между электровозом и тяговой подстанцией.

При управлении однофазными обратимыми преобразователями напряжения с постоянным углом сдвига необходимо дополнительно учитывать технологическое уменьшение активного сопротивления, например, из-за износа контактного провода.

Результаты. В статье показаны возможность и условия осуществления рекуперативного торможения на электровозах переменного тока. Согласно полученным результатам к разработке рекомендуется более прогрессивная система управления током электровоза с дополнительным каналом регулирования индуктивной составляющей тока рекуперации.

Обсуждение и заключение. Прогрессивная система управления может способствовать стабилизации напряжения на токоприемнике и совместно с каналом регулирования активной составляющей тока рекуперации обеспечивать поддержание величины напряжения на более высоком уровне, определяемом фактическими электрическими параметрами контактной сети и поездной обстановкой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз переменного тока, тяговая сеть, тяговая подстанция, однофазный обратимый преобразователь напряжения, рекуперативное торможение, асинхронный тяговый двигатель, биполярный транзистор с изолированным затвором

Для цитирования: Кучумов В. А., Никончук И. Н. О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 31–37. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37



IMPLEMENTATION OF REGENERATIVE BRAKING ON THE AC LOCOMOTIVE WITH A MONOPHASE REVERSIBLE VOLTAGE CONVERTER

Vladislav A. Kuchumov, Ivan N. Nikonchuk

Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors analyse the problem of implementing regenerative braking on the AC locomotive with a monophasе reversible voltage converter.

Materials and methods. The article considered theoretically possible options for the operation of monophasе reversible voltage converters during regenerative braking, in which: 1) the reactive component of the electric locomotive current had a capacitive nature, and the operating current of the electric locomotive was ahead of its reactive component; 2) the reactive component of the electric locomotive current had an inductive nature, and the current of the electric locomotive was ahead of its active component. The research demonstrated that the former was only theoretically possible, since the regeneration of current into the contact network was carried out at a very low voltage, significantly less than the lowest voltage on the current collector. The latter was technically feasible in terms of the main harmonic of the electric locomotive current lagged by an angle exceeding of 90 electrical degree, but noticeably smaller than 180 electrical degree. Regenerative braking with a power factor close to unity was possible only theoretically, but in practice a power factor of 0.8–0.9 should be realized. The tangent of the angle between the effective current and its active component was greater (for a certain margin) than the quotient from dividing the active by the inductive resistance of the traction network between the electric locomotive and the traction substation. Moreover, it was necessary to consider the technological reduction of the ohmic resistance in the process of the monophasе reversible voltage transducer control (e. g. over the deterioration of contact wire).

Results. The article demonstrates the possibility and conditions for the regenerative braking implementation on AC locomotives. Hence, a more advanced electric locomotive current control system with an additional channel for regulating the inductive component of the recuperation current is recommended for development.

Discussion and conclusion. An advanced control system stabilizes the current collector voltage and with the channel for regulating the active component of the regeneration current provide for the voltage maintenance at a higher level, determined by the actual electrical parameters of the contact network and the train traffic.

KEYWORDS: AC locomotive, traction network, traction substation, monophasе reversible voltage converter, regenerative braking, asynchronous tractive motor, bipolar insulated gate transistor

For citation: Kuchumov V.A., Nikonchuk I.N. Implementation of regenerative braking on the AC locomotive with a monophasе reversible voltage converter. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):31–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-31-37>.

Введение. На российских железных дорогах, электрифицированных однофазным переменным током частотой 50 Гц и напряжением 25 кВ, в массовом порядке эксплуатируются грузовые электровазны семейства «Ермак» (2ЭС5К и т. п.) с коллекторными тяговыми двигателями (КТД). На этих электровазонах установлены выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), обеспечивающие режимы тяги и рекуперативного торможения (РТ), выполняемые с пониженным коэффициентом мощности [1, 2].

На замену таким электровазонам разрабатываются и поставляются на линию электровазны нового поколения с однофазными обратимыми преобразователями напряжения (ООПН), способными работать в четырех квадрантах комплексной плоскости, и поэтому первоначально названные разработчиками из ФРГ [3, 4, 5] четырехквадрантными. При работе электровазона в тяговом режиме между основными гармониками напряжения на токоприемнике и тока в сетевой обмотке тягового трансформатора поддерживается заданное значение угла сдвига $\varphi_1 = 0$, поэтому в широком диапазоне нагрузок коэффициент мощности практически равен 1 [6]. Напротив, работа электровазона в режиме РТ с заданным значением угла сдвига $\varphi_1 = 180$ эл. град. оказалась неудовлетворительной [7].

Исследование причины неудовлетворительной работы РТ и поиск практических предложений проведены на расчетной схеме одностороннего питания одного электровазона с ООПН и асинхронными тяговыми двигателями (АТД) от тяговой подстанции (бесконечно большой мощности) через тяговую сеть с активным R и индуктивным X сопротивлением на частоте 50 Гц (рис. 1). АТД с линейным напряжением 1200...1400 В получают питание от индивидуальных автономных инверторов напряжения (АИН). В звене постоянного напряжения U_d установлен мощный фильтровой конденсатор C с номинальным напряжением на уровне 1500...1800 В. В каждом плече ООПН и АИН установлены по одному биполярному транзистору с изолированным затвором (БИТЗ) 33 класса на ток 1200...1500 А. Тяговый трансформатор выполнен с чередующимися кольцами обмоток высокого (сетевой обмотки с номинальным напряжением $U_c = 25$ кВ) и низкого напряжения (тяговая обмотка с номинальным напряжением $U_t = 1...2$ кВ) [8]; благодаря такой конструкции трансформатор имеет увеличенную индуктивность рассеяния, препятствующую проникновению в тяговую сеть высших гармоник тока и придающую ООПН как источнику питания свойства источника тока [6].

Основным преимуществом ООПН является его возможность, благодаря использованию быстродействующих БИТЗ, сформировать практически синусоидальный ток в тяговой и, соответственно, в сетевой

обмотках трансформатора, причем ток в сетевой обмотке может быть сдвинут относительно напряжения U_c на ней на любой, наперед заданный, угол сдвига φ .

Целью работы является научное обоснование основных технических требований к режиму РТ электровазона с ООПН.

Рассмотрены оба теоретически возможных варианта [9, 10, 11] режима работы ООПН:

- реактивная составляющая тока I_p электровазона имеет емкостной характер, и активная составляющая тока I_a опережает действующий ток I на угол сдвига φ (рис. 2, а);
- реактивная составляющая тока I_p имеет индуктивный характер, и действующий ток I опережает его активную составляющую I_a также на угол сдвига φ (рис. 2, б).

Напряжения и токи векторных диаграмм [8, 9], представленных на рис. 2, связаны между собой уравнением

$$U_n^2 = (U_c^2 - IR \cos \varphi \pm IX \sin \varphi)^2 + (IX \cos \varphi \pm IR \sin \varphi)^2, \quad (1)$$

где U_n — напряжение тяговой подстанции, В.

В уравнении (1) и в уравнении (2) знаки вычитания при $\sin$ относятся к рис. 2, а, знаки сложения — к рис. 2, б.

Обозначенный на рисунке угол сдвига φ может изменяться в пределах $0 \leq \varphi \leq 90$ эл. град.

Поделив обе части уравнения (1) на I^2 , получим

$$(Z_c - R \cos \varphi \pm X \sin \varphi)^2 = Z_n^2 - (X \cos \varphi + R \sin \varphi)^2, \quad (2)$$

где $Z_c = U_c / I$ имеет размерность Ом и может быть условно названо расчетным сопротивлением тяговой подстанции, внутреннее сопротивление которой не учитывается; Z_n — фактическое сопротивление тяговой подстанции, $Z_n = U_n / I$.

После преобразований получается

$$Z_n^2 - Z_c^2 = R^2 + X^2 + 2Z_c(R \cos \varphi \pm X \sin \varphi), \quad (3)$$

где знаки сложения при $\sin$ относятся к рис. 2, а, вычитания — к рис. 2, б.

Левая часть этого уравнения дает для анализа три следующих варианта:

- 1) $Z_c > Z_n$. Очевидно, что это неравенство является условием РТ, которое следует понимать в соответствии со следующим определением: «Рекуперативное торможение — торможение железнодорожного подвижного состава, которое осуществляется посредством электрического тормоза и при котором высвобождаемая при переводе тяговых двигателей в генераторный режим электрическая энергия передается в контактную сеть» [12].

- 2) $Z_c < Z_n$. При этом условии РТ невозможно.

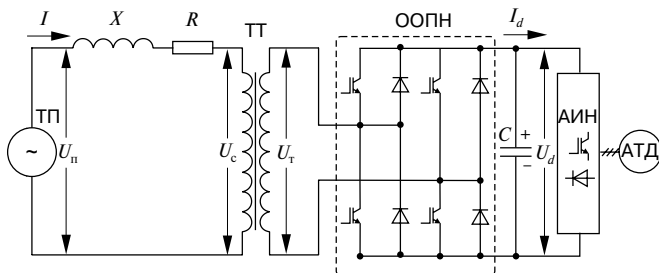


Рис. 1. Расчетная схема питания электроваза с ООПН от тяговой подстанции (ТП):

ТТ — тяговый трансформатор; АИИ — автономный инвертор напряжения; АТД — асинхронный тяговый двигатель; I — ток тяговой сети частотой 50 Гц, А; I_d — выпрямленный ток между ООПН и АИИ, А; U_n — напряжение тяговой подстанции, В; U_c — напряжение сетевой обмотки трансформатора электроваза, В; U_t — напряжение тяговой обмотки трансформатора электроваза, В; U_d — напряжение на фильтровом конденсаторе, В; C — фильтровый конденсатор; X — индуктивное сопротивление тяговой сети на частоте 50 Гц, Ом; R — активное сопротивление тяговой сети, Ом

Fig. 1. Calculated power supply model for an electric locomotive with monophasе reversible voltage converters of a traction substation: ТТ — traction transformer; АИИ — autonomous voltage inverter; АТД — asynchronous traction motor; I — current of the traction network at the 50 Hz frequency, A; ООПН — monophasе reversible voltage converter; ТП — traction substation; I_d — rectified current between ООПН and АИИ, A; U_n — voltage of the traction substation, V; U_c — voltage of the mains winding of the electric locomotive transformer, V; U_t — voltage of the traction winding of the electric locomotive transformer, V; U_d — voltage across the filter capacitor, V; C — filter capacitor; X — inductive resistance of the traction network at the 50 Hz frequency, Ohm; R — active resistance of the traction network, Ohm

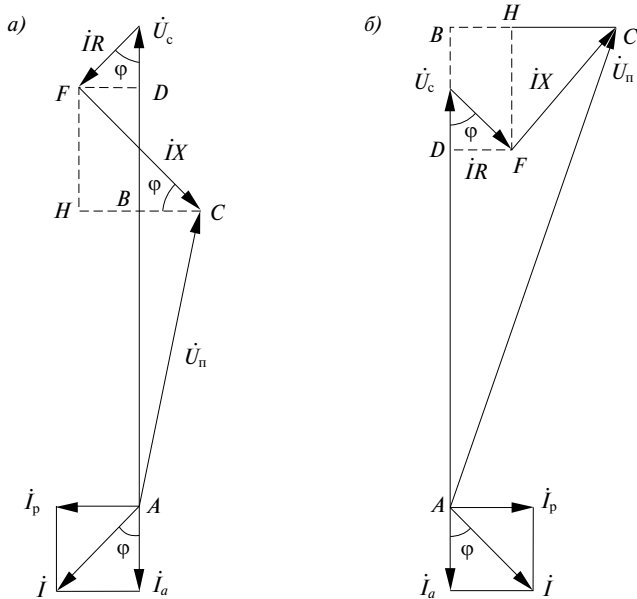


Рис. 2. Векторные диаграммы токов, напряжений и падений напряжений для режима электрического торможения при опережающем (а) и отстающем (б) токах:

IR — падение напряжения на активном сопротивлении тяговой сети, В; IX — падение напряжения на индуктивном сопротивлении тяговой сети, В

Fig. 2. Vector diagrams of currents, voltages and voltage drops for the electric braking mode with leading (a) and lagging (b) currents: IR — voltage drop across the active resistance of the traction network, V; IX — voltage drop on the inductive resistance of the traction network, V

3) $Z_c = Z_n$. Это уравнение для построения линии ограничения области теоретически возможного РТ.

Ограничения режима. Введем в (3) новое обозначение

$$Z_{nc} = Z_n = Z_c, \quad (4)$$

где Z_{nc} — расчетное сопротивление при условии $Z_n = Z_c$.

Тогда с учетом (4) получаем уравнение

$$Z_{nc} = (R^2 + X^2) / 2(R \cos \varphi - X \sin \varphi), \quad (5)$$

определяющее линию ограничения области РТ (рис. 3, линия 1).

При построении этой зависимости отрицательные значения угла сдвига φ соответствуют первому варианту режима работы ООПН, при котором активная составляющая тока электроваза опережает действующий ток (рис. 2, а), а положительные значения — второму варианту, при этом угол сдвига изменяется во всем возможном диапазоне от -90 до 90 эл. град. (рис. 2, б).

В общем случае тяговая сеть является электрической цепью с распределенными параметрами [13]. Определению величин активного и индуктивного сопротивлений тяговой сети посвящен ряд работ [13, 14, 15, 16]. В [14, 15] указаны погонные параметры продольного активного сопротивления $r = 0,107$ Ом/км, индуктивного сопротивления $x = 0,257$ Ом/км, поперечных активного сопротивления $r_0 = 6$ Мом/км и емкостного сопротивления $x_0 = 10,97$ МОм/км. Последние два сопротивления слишком велики и в электрических расчетах тяговых сетей промышленной частоты 50 Гц [9, 10] не учитываются. Таким образом, для участка одностороннего питания электроваза длиной 20 км остаются два сопротивления: $R = 2,14$ Ом и $X = 5,14$ Ом; эти параметры приняты в расчет для линии 1, ограничивающей область РТ по критерию $U_c > U_n$ (рис. 3). Зависимость $Z_{nc}(\varphi)$ имеет разрывной характер, ее начальный участок асимптотически приближается к граничному значению угла φ , определенному в виде

$$\varphi_r = \arctg(R/X) = 22,6 \text{ эл. град.} \quad (6)$$

и $\cos 22,6 \text{ эл. град.} = 0,93$.

На рис. 3 также изображена линия 2, ограничивающая область РТ по величине минимального значения Z_{nc} в эксплуатации. Минимальное значение Z_{nc} определяется следующим образом: рекуперлируемая мощность 7000 кВт 8-осного электроваза с АТД соответствует току $I = 7000/19 = 370$ А. Следовательно, $Z_{nc \min} = 19000/370 \approx 50$ Ом. Практическое значение имеет линия ограничения 1, лежащая выше линии 2, когда результат расчета по формуле (5)

почти не отличим от вертикальной линии с абсциссой $\varphi_r = 22,6$ эл.град. (линия 3).

Дополнительно можно определить точку пересечения линии с осью ординат при $\varphi = 0$, соответствующую ординате:

$$Z_{nc} = (X^2 + R^2) / 2R = 7,24 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Это довольно низкое значение, намного меньшее $Z_{nc \min} \approx 50$ Ом и подтверждающее практическую невозможность реализации РТ при $\cos \varphi = 0$, о чем уже упоминалось выше.

Другим выводом из анализа зависимостей рис. 3 является факт технической невыполнимости РТ в соответствии с векторной диаграммой рис. 2, а. РТ электропоездов с ООПН и АТД следует выполнять исключительно в соответствии с векторной диаграммой рис. 2, б; при этом рабочая точка должна лежать выше горизонтальной штриховой линии и правее вертикальной сплошной линии, т. е. практически с вертикальной линией на абсциссе φ_r .

На рис. 3, чтобы не увеличивать без нужды размера графика, показана лишь небольшая часть разрешенной площади для применения РТ в виде выделенной прямоугольной области; эта область имеет продолжение вдоль оси ординат до бесконечности, так как ток I может уменьшаться до 0, и вдоль оси абсцисс до угла $\varphi = 90$ эл. град. (исключительно).

Результаты анализа. При всех величинах напряжения на сетевой обмотке трансформатора, лежащих внутри пределов по [1], следует соблюдать равенство

$$\arctg(R/X) < \varphi < 90^\circ. \quad (8)$$

При этом угол φ не меняется с изменением длины тяговой сети между электропоездом и тяговой подстанцией.

Угол отставания вектора основной гармоники тока от вектора основной гармоники напряжения должен лежать в пределах

$$90^\circ < \varphi_1 < (180^\circ - \arctg(R/X)). \quad (9)$$

Отношение R/X не является постоянным, так как в процессе эксплуатации железнодорожных линий происходит износ контактного провода и может меняться состояние рельсового пути. Поэтому неравенство (9) следует откорректировать в виде

$$\varphi_1 < 180^\circ - \arctg(R_{\max}/X_{\min}). \quad (10)$$

Угол сдвига φ должен быть несколько больше угла φ_r вследствие необходимости создания технологического запаса в практической реализации системы управления ООПН, возможного вредного влияния

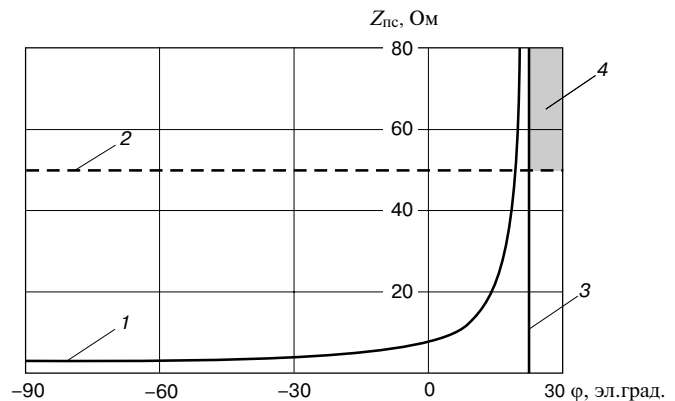


Рис. 3. Область РТ по критерию $U_c > U_n$:

1 — ограничение по критерию $U_c > U_n$; 2 — ограничение по наименьшему напряжению на токоприемнике [1]; 3 — угол φ_r при увеличении Z_{nc} до бесконечности; 4 — область реализации режима РТ

Fig. 3. Regenerative braking area according to the $U_c > U_n$ criterion: 1 — $U_c > U_n$ criterion limitation; 2 — limitation at the lowest voltage of the current collector [1]; 3 — angle φ_r to infinity; 4 — implementation area of the regenerative braking mode

переходных процессов в тяговой сети и даже изменения частоты питающего напряжения.

Заключение. Несмотря на замену ВИП на ООПН и КТД на АТД рекуперативный тормоз на электропоездах переменного тока сохраняет все свои характерные принципиальные черты:

- векторная диаграмма напряжения и тока сохраняется по рис. 2, б;
- угол отставания вектора основной гармоники тока от вектора основной гармоники напряжения вычисляется по одинаковому неравенству $\varphi_1 < (180^\circ - \varphi)$. Угол φ для электропоездов семейства «Ермак» рассчитывается по формуле

$$\varphi = \delta + \gamma / 2,$$

где δ — угол запаса; γ — угол коммутации тока в однофазном зависимом инверторе тока, именуемом ВИП.

При времени включения тиристоров 150...200 мкс угол δ может примерно равняться 5 эл. град, но во избежание нарушения инверторного режима в реальных условиях эксплуатации этот угол устанавливается равным 20...25 эл. град., а часто и большим, что вызывает снижение коэффициента мощности с 0,85 до 0,65 и менее. Кроме того, на этих электропоездах часть энергии поглощается в стабилизирующих резисторах, необходимых для устойчивости РТ.

Постоянный нерегулируемый угол φ для электропоездов нового поколения с ООПН и АТД равен $\varphi = \arctg(R/X)$ с некоторым пока неизвестным запасом, однако можно предположить, что коэффициент

мощности не будет понижаться ниже 0,8. Поэтому следует ожидать повышения энергетических показателей режима РТ.

Теоретически доказано отсутствие других вариантов РТ на электровазгах переменного тока с ООПН и АТД. Рекомендуется к разработке на перспективу более прогрессивная система управления током электровазга с дополнительным каналом регулирования индуктивной составляющей тока рекуперации, которая способствует стабилизации напряжения на токоприемнике и совместно с каналом регулирования активной составляющей тока рекуперации обеспечивает поддержание величины напряжения на более высоком уровне, определяемом фактическими электрическими параметрами контактной сети и поездной обстановкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 6962–75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: дата введения 1977-01-01. М.: Гос. комитет стандартов Совета Министров СССР, 1976. 8 с.
2. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровазги переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 312 с.
3. Depenbrock M. Einphasen–Stromrichter mit sinusförmigen Netzform und gut geglätteten Gleichgrößen // ETZ–A. 1973. Vol. 94, Heft 8. S. 466–471.
4. Körber J. Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren // Elektrische Bahnen. 1974. No. 45, Heft 3. S. 52–59.
5. Guthlein H. Die neue elektrische Lokomotive 10 der Deutschen Bundesbahn in Drehstromantriebstechnik // Elektrische Bahnen. 1974. No. 45, Heft 9. S. 248–257.
6. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q–S преобразователями // Электротехника. 1993. № 5. С. 23–31.
7. Игин В. Н. Энергоэффективность локомотивов в зеркале статистики // Локомотив. 2016. № 8. С. 2–6.
8. Усвицкий С. А. Пути создания нового поколения магистральных электровазгов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровазгостроения (Вестник ВЭЛНИИ). 2009. № 2 (58). С. 17–33.
9. Марквардт К. Г. Электрообеспечение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
10. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электрообеспечение железных дорог: учеб. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
11. Быков Ю. Г., Иньков Ю. М., Симонов М. Д. Регулирующие характеристики однофазного обратимого преобразователя напряжения // Электричество. 1996. № 9. С. 63–66.
12. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР/ТС 001/2011 (в редакции Решения Совета Евразийской экономической комиссии от 14 сентября 2021 г. № 90) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvignoisostev%20PID.pdf> (дата обращения: 11.02.2022).
13. Кулинич Ю. М. Электронная преобразовательная техника: учеб. пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. 202 с.
14. Ермоленко Д. В. Повышение электромагнитной совместимости системы тягового электрообеспечения с тиристорным

электроподвижным составом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09. М.: ВНИИЖТ, 1979. 22 с.

15. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть — электровазг» // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.

16. Сопровождение электровазговой сети однофазного переменного тока железных дорог / Е. П. Фигурнов [и др.] // Электричество. 2021. № 11. С. 35–44.

REFERENCES

1. GOST 6962–75. Transport elektrifitsirovanny s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy [Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row], data vvedeniya [introduction date] 1977-01-01. Moscow: Gos. komitet standartov Soveta Ministrov SSSR [State committee of standards of the Council of Ministers of the USSR] Publ.; 1976. 8 p. (In Russ.).
2. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. Elektrovozzy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ.; 1988. 312 p. (In Russ.).
3. Depenbrock M. Einphasen–Stromrichter mit sinusförmigen Netzform und gut geglätteten Gleichgrößen. ETZ–A. 1973;94(8):466–471.
4. Körber J. Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren. Elektrische Bahnen. 1974;45(3):52–59.
5. Guthlein H. Die neue elektrische Lokomotive 10 der Deutschen Bundesbahn in Drehstromantriebstechnik. Elektrische Bahnen. 1974;45(9):248–257.
6. Litovchenko V. V. Opredelenie energeticheskikh pokazateley elektropodvizhnogo sostava peremennogo toka s 4q–S preobrazovatelyami [Determination of energy indicators of AC electric rolling stock with 4q–S converters]. Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering. 1993;(5):23–31. (In Russ.).
7. Igin V. N. Energoeffektivnost' lokomotivov v zerkale statistiki [Energy efficiency of locomotives in the mirror of statistics]. Lokomotiv = Locomotive. 2016;(8):2–6. (In Russ.).
8. Usvitskiy S. A. Puti sozdaniya novogo pokoleniya magistral'nykh elektrovozov [Ways to create a new generation of mainline electric locomotives]. Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i projektno-konstruktor'skogo instituta elektrovozostroyeniya (Vestnik VELNII) = Bulletin of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building (VELNII Bulletin). 2009;2(58):17–33. (In Russ.).
9. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport Publ.; 1982. 528 p. (In Russ.).
10. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. Elektrosnabzhenie zheleznikh dorog: ucheb. [Power supply of railways: Textbook]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ.; 2014. 432 p. (In Russ.).
11. Bykov Yu. G., In'kov Yu. M., Simonov M. D. Regulirovochnye kharakteristiki odnofaznogo obratimogo preobrazovatelya napryazheniya [Regulating features of a monophas reversible voltage converter]. Elektrichestvo = Electricity. 1996;(9):63–66. (In Russ.).
12. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza: TR/TS 001/2011 (v redaktsii Resheniya Soveta Evraziyskoy ekonomicheskoy komissii ot 14 sentyabrya 2021 g. № 90) [On the safety of railway rolling stock: technical regulations of the Customs Union: TR/TS 001/2011 (as amended by the Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated September 14, 2021 No. 90)]. URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Documents/TR%20Podvignoisostev%20PID.pdf> (access date: 11.02.2022). (In Russ.).
13. Kulnich Yu. M. Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika: ucheb. posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transporta [Electronic

converting technology: Tutorial for students of transport universities]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2015. 202 p. (In Russ.).

14. Ermolenko D. V. Povyshenie elektromagnitnoy sovmestimosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s tiristornym elektropodvizhnym sostavom: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the electromagnetic compatibility of the traction power supply system with thyristor electric rolling stock: Cand. ... Dr. Tech. Sci. Synopsis]. Moscow: VNIIZhT Publ.; 1979. 22 p. (In Russ.).

15. Savos'kin A. N., Kulnich Yu. M., Alekseev A. S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoy sisteme "kontaktnaya set'—elektrovoz" [Mathematical modeling of electromagnetic processes in the dynamic system "contact network—electric locomotive"]. *Elektrichestvo = Electricity*. 2002;(2):29–35. (In Russ.).

16. Figurnov E. P., Bykadorov A. L., Zharkov Yu. I., et al. Soprotivleniya elektroyagovoy seti odnofaznogo peremennogo toka zheleznykh dorog [Resistances of the electric traction network of monophasic AC of railways]. *Elektrichestvo = Electricity*. 2021;(11):35–44. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владислав Алексеевич КУЧУМОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, НЦ «Тяга поездов», АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Иван Николаевич НИКОНЧУК,

аспирант, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1032809, <https://orcid.org/0000-0002-4579-4743>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav A. KUCHUMOV,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, SC "Traction of Trains", JSC "VNIIZhT", AuthorID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Ivan N. NIKONCHUK,

Post-graduate, JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1032809, <https://orcid.org/0000-0002-4579-4743>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владислав Алексеевич КУЧУМОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований (50%).

Иван Николаевич НИКОНЧУК. Обзор основных результатов эксплуатации электропоездов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями в режиме рекуперативного торможения, методика расчета, анализ результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladislav A. KUCHUMOV. Formation of the direction of the research, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm (50%).

Ivan N. NIKONCHUK. Review of the main results of the operation of AC locomotives with commutator traction motors in the regenerative braking mode, calculation methodology, analysis of the results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 14.02.2022, первая рецензия получена 17.02.2022, вторая рецензия получена 21.02.2022, принята к публикации 28.02.2022.

The article was submitted 14.02.2022, first review received 17.02.2022, second review received 21.02.2022, accepted for publication 28.02.2022.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том I. Грузовые вагоны / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. — М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. — 456 с.

Рассмотрены базовые аспекты, связанные с созданием и эксплуатацией грузовых вагонов. Приведены общие соображения, касающиеся способов повышения провозной способности железных дорог, производительности перевозочного процесса. Представлен пример обзора конструкций грузовых вагонов. Даны методические основы анализа и испытаний, проводимых с целью выяснения эксплуатационного ресурса по усталостной долговечности грузовых вагонов и их компонентов. Приведены экономические соображения, касающиеся применения затрат жизненного цикла для определения суммарной стоимости владения вагоном до конца срока службы. Кратко описаны современные методы компьютерного

моделирования усталостных проявлений в контактах качения и процедуры испытаний. Освещается передовой опыт контроля технического состояния, технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Рассмотрены мероприятия технического обслуживания и ремонта и особенности нормативно-правового регулирования технической эксплуатации грузовых вагонов разных стран. Описаны средства мониторинга технического состояния грузовых вагонов и поездов непосредственно в процессе движения. Приведена информация о ряде полезных систем мониторинга.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся вопросами железнодорожного транспорта, и студентов, изучающих данные проблемы.

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

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



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научная статья

УДК 621.332

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52



О СРАВНЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В. Л. Незевак

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются энергетические параметры систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. Целью исследования является оценка энергетических параметров систем накопления электроэнергии при их размещении в границах межподстанционной зоны системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ.

Материалы и методы. В исследовании использованы методы имитационного моделирования, статистики и обработки результатов эксперимента. Оценка параметров системы накопления выполнена на основе тяговых расчетов для электроподвижного состава переменного тока применительно к межподстанционной зоне одного из участков Среднесибирского хода с системой тягового электроснабжения переменного тока. Расчеты по определению энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения выполнены для двух вариантов: при отсутствии и при наличии системы накопления электроэнергии. При расчете взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения моделирование работы системы накопления электроэнергии выполнено для источника напряжения, подключенного к шинам поста секционирования.

Результаты. На основе имитационного моделирования получены графики активной и реактивной мощности по плечам межподстанционной зоны в условиях работы активного поста секционирования для расчета параметров систем накопления электроэнергии. Рассчитан график ожидаемой степени заряженности, оценена глубина разряда для номинальной энергоемкости и представлена требуемая зарядная характеристика, обеспечивающая восстановление степени заряженности системы накопления до начального уровня.

Обсуждение и заключение. Дана сравнительная оценка параметров систем накопления для систем тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ и переменного тока напряжением 25 кВ. Проведенное исследование показало возможность снижения номинальных параметров систем накопления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система тягового электроснабжения, переменный ток, система накопления электроэнергии, стабилизация напряжения, пост секционирования, энергоемкость, график степени заряженности

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

Для цитирования: Незевак В. Л. О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 38–52. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.332

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52



COMPARISON OF ENERGY PARAMETERS OF ELECTRIC STORAGE SYSTEMS FOR DC AND AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

Vladislav L. Nezevak

Omsk State Transport University (OmGUPS),
Omsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the energy parameters of electric power storage systems for DC and AC traction power supply systems. The purpose of the research is to evaluate the energy parameters of electric power storage systems located within the inter-substation zone boundaries of the AC traction power supply system at the 25 kV voltage.

Materials and methods. The author used the methods of modeling, statistics and the experimental results processing. Moreover, the paper presented the parameter estimation of the energy accumulation system on the basis of the traction calculations for the AC rolling stock. In addition, the author made two variants of calculations — in the presence and the absence of the electric storage system. The researcher also made the simulation of the electric storage system for the voltage source connected to the sectioning post busbars.

Results. Using the simulation modeling, the author presents active and reactive power graphs of the inter-substation zone boundaries in the active sectioning post operation conditions. Therefore, the article demonstrates the graph of the expected charge, the discharge depth calculations for the nominal energy capacity and the required charging features, which guarantee the charge restoration of the accumulation system to the initial level.

Discussion and conclusion. The author offers the comparative assessment of the electric storage systems for the traction power supply with the DC voltage of 3 kV and the AC voltage of 25 kV. The research demonstrates the reducing potential of the nominal accumulation parameters.

KEYWORDS: traction power supply system, AC, electric storage system, voltage stabilization, sectioning post, energy capacity, graph of the expected charge

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-00002, <https://rscf.ru/project/22-29-00002/>.

For citation: Nezevak V.L. Comparison of energy parameters of electric storage systems for DC and AC traction power supply systems. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):38–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-38-52>.

Введение. Проблематика повышения надежности и эффективности работы электроэнергетических систем относится главным образом к вопросам использования систем накопления электроэнергии. В настоящее время в мире актуальными являются направления исследований по применению систем накопления в сетях с распределенной генерацией [1, 2], в том числе постоянного тока [3], а также в транспортных комплексах [4].

Использование систем накопления в тяговой энергетике железнодорожного транспорта позволяет решить ряд задач по стабилизации напряжения, выравниванию графика электрической нагрузки, повышению эффективности применения рекуперативного торможения [5, 6] и др. Решение указанных задач актуально как для системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ, так и для системы тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ.

Основными эффектами применения систем накопления в системе тягового электроснабжения постоянного тока являются повышение нагрузочной способности в части увеличения минимального уровня напряжения на токоприемнике, снижение загрузки преобразователей и силовых трансформаторов, повышение эффективности применения рекуперативного торможения и энергии рекуперации в границах межподстанционных зон, как это показано в [7]. Указанные эффекты могут быть получены и в системе тягового электроснабжения переменного тока с учетом ее специфики — влиянием реактивной мощности на энергетические показатели, более высоким уровнем электротяговой нагрузки в границах межподстанционных зон, большим парком электроваз, не оснащенных системами рекуперативного торможения, например серии ВЛ80С.

Одним из направлений повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока является применение регулируемых устройств, например статических генераторов реактивной мощности (СГРМ), статических компенсаторов (СТК) и др. В связи с этим следует рассматривать задачу согласованной работы систем накопления с указанными устройствами для решения ряда задач (стабилизации напряжения, повышения качества электроэнергии и др.). Необходимо отметить, что проводимые исследования [8–10] не в полной мере рассматривают вопросы стабилизации напряжения на межподстанционных участках, где наблюдается минимальное напряжение на токоприемнике. Появление серий локомотивов с асинхронным тяговым приводом способствует повышению коэффициента мощности тяговой нагрузки, что позволяет в перспективе снизить потребляемую тяговой нагрузкой

реактивную мощность и уменьшить эффективность работы устройств компенсации реактивной мощности. Так, для электровазов серии 2ЭС7 заявленный коэффициент мощности выше значения 0,95 (при нагрузке выше 25 % продолжительного режима) [11, 12], что обусловлено появлением современных полупроводниковых приборов (MOSFET, IGCT, IGBT, GTO и др.), используемых при производстве выпрямительных и инверторных преобразователей различного вида [13]. Применение четырехквadrантных преобразователей на основе современной полупроводниковой базы позволяет существенно снизить потребление реактивной мощности и несинусоидальность напряжения [14].

Одним из вариантов усиления системы тягового электроснабжения является применение систем накопления на линейных устройствах, таких как посты секционирования [15–17]. В качестве ожидаемых эффектов применения систем накопления на постах секционирования следует отметить:

- повышение нагрузочной способности системы тягового электроснабжения;
- снижение потерь энергии, мощности и напряжения в контактной сети;
- повышение качества электроэнергии.

С целью оценки основных параметров систем накопления электроэнергии, предназначенных для работы в системе тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, рассматриваются энергетические показатели до и после преобразования поста секционирования в активный. Оценка параметров выполняется для задачи поддержания напряжения на шинах поста секционирования с целью повышения пропускной способности на участке железной дороги. В связи с этим в настоящей статье акцент сделан на определении параметров системы накопления для активной мощности тяговой нагрузки.

Влияющие факторы. Исследования условий работы систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока позволяют выделить основные факторы, оказывающие влияние на энергетические параметры.

1. Места размещения в системе тягового электроснабжения. Места размещения систем накопления в тяговом электроснабжении определяются в зависимости от решаемых задач. Для задач по стабилизации напряжения в контактной сети рассматриваются варианты размещения систем накопления на линейных пунктах (постах секционирования и пунктах параллельного соединения контактной сети). За счет приближения ординаты размещения систем накопления к ординатам с наименьшим уровнем напряжения на токоприемнике электроподвижного состава решается задача стабилизации напряжения,

а значение компенсации напряжения зависит от электротяговой нагрузки. При решении задач по снижению загрузки силового оборудования подстанции и регулированию внешней характеристики подстанции рассматривается размещение систем накопления на тяговых подстанциях.

Альтернативный способ размещения систем накопления — на борту электроподвижного состава. Такое размещение является наиболее технически эффективным [18, 19], но и более затратным, как это показано в [20]. В случае относительно высокой интенсивности движения суммарная энергоемкость систем накопления для систем тягового электроснабжения оказывается существенно ниже, чем для бортовых систем электроподвижного состава.

2. Профиль пути. Профили пути на электрифицированных участках оказывают существенное влияние на режимы вождения поездов и напряжения в системе тягового электроснабжения, тяговое электропотребление и уровень технических потерь [21, 22], а также условия работы систем накопления. Эффективность применения систем накопления выше на участках с горным профилем пути (3-го и 4-го типов) в условиях преобладания грузового движения за счет интенсивного применения рекуперативного торможения. В условиях преобладания пассажирского движения системы накопления оказываются эффективны и на равнинных профилях пути за счет частых торможений, обусловленных необходимостью остановок у посадочных пассажирских платформ.

3. Преобладание видов движения. Особенности эксплуатации систем накопления на участках с преобладанием грузового движения заключаются в достаточно продолжительных режимах тяги и рекуперативного торможения, что повышает требования к номинальной мощности и энергоемкости. При преобладании пассажирского движения (например, в условиях Московского центрального кольца) особенности эксплуатации заключаются в существенном изменении частоты циклов разгон-торможение, что приводит к уменьшению продолжительности режимов и позволяет снизить мощность и энергоемкость систем накопления при эксплуатации в данных условиях [23].

4. Количество главных путей участка. Количество главных путей на электрифицированных участках оказывает влияние на номинальные параметры систем накопления. Эффективность передачи энергии в условиях двух- и многопутных участков выше, чем для однопутных [24–26]. В связи с этим для повышения нагрузочной способности системы тягового электроснабжения на однопутных участках, особенно с преобладанием грузового движения, требуются большие номинальные параметры систем накопления.

5. Применение рекуперативного торможения. Применение рекуперативного торможения на электроподвижном составе приводит к повышению нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и облегчению условий работы систем накопления в зависимости от интенсивности рекуперации [27, 28]. В случае отсутствия рекуперативного торможения на участке расчет параметров систем накопления выполняется с учетом заряда от смежных тяговых подстанций по контактной сети или по специальным линиям, что приводит к увеличению загрузки силового оборудования и снижает уровень напряжения в контактной сети. В связи с этим на участках с отсутствием рекуперативного торможения эффективность работы систем накопления ниже, чем на участках с его применением.

6. Специальное применение. Системы накопления применяются также и в нетяговой энергетике, особенно на участках, где можно использовать возможности рекуперативного торможения. Одним из примеров такого применения является техническое решение для системы собственных нужд тяговой подстанции. Предварительные расчеты показывают техническую эффективность данного мероприятия, основанную на возможности отказа от постоянного подключения системы собственных нужд к шинам переменного тока подстанции и реализации электроснабжения от системы накопления, подключенной к шинам постоянного тока подстанции, принимающей мощность рекуперации [29]. Возможно применение систем в качестве передвижных комплексов для решения вопросов усиления системы тягового электроснабжения в вынужденных режимах работы и при проведении работ по капитальному ремонту пути и контактной сети.

7. Применение различных видов накопителей. В общем случае в качестве накопителей могут применяться различные виды электрохимических, электрических, кинетических, гравитационных и других устройств. Однако при выборе вида накопителей и топологии систем накопления следует учитывать особенности их работы с проектируемой нагрузкой. Основные из них сводятся к тому, что, во-первых, необходимо выбирать активную топологию систем накопления и отказаться от пассивной ввиду ее низкой эффективности, а, во-вторых, применение относительно дешевых электрохимических накопителей приводит к необходимости увеличения номинальной энергоемкости системы с целью ограничения глубины разряда и продления ее срока службы. Для применения в системах тягового электроснабжения перспективными представляются гибридные системы накопления с активной топологией, построенные на управляемых преобразователях и двух видах накопителей, например

Таблица 1

Условия работы и параметры систем накопления для участков железных дорог

Table 1

Operating conditions and accumulation system parameters for railway sections

Условия работы и параметры	Октябрьская	Свердловская			Московская	Западно-Сибирская	
Место размещения	ПС	ПС	ПС	ТП	ПС	ПС	ТП
Кол-во путей	2	1	2	2	2	2	1
Вид движения	Грузовое	Грузовое	Грузовое	Грузовое	Пассажирское	Грузовое	Грузовое
Показатель нагрузочной способности системы тягового электроснабжения	$U_{\min}$	$U_{\min}$	$U_{\min}$	$I_{\max}$	$W_{\text{рек}}$	$U_{\min}$	$W_{\text{сн}}$
P_n , МВт	1,5	1,8	1,5	9,0	2,7	2,5	1,7
W_n , МВт·ч	1,6	2,3	1,6	3,0	1,3	1,3	1,7

Примечания: ПС — пост секционирования; ТП — тяговая подстанция; P_n — номинальная мощность; W_n — номинальная энергоемкость; $U_{\min}$ — минимальное напряжение на токоприемнике; $W_{\text{рек}}$ — объем энергии рекуперации; $W_{\text{сн}}$ — объем энергии на собственные нужды; $I_{\max}$ — максимальный ток силового оборудования.

Notes: ПС — sectioning post; ТП — traction substation; P_n — rated power; W_n — rated energy intensity; $U_{\min}$ — minimum voltage on the current collector; $W_{\text{рек}}$ — volume of recuperation energy; $W_{\text{сн}}$ — amount of energy for own demands; $I_{\max}$ — maximum current of the power equipment.

электрохимического и электрического (суперконденсатора, не чувствительного к глубине разряда) [30, 31].

8. *Результаты, полученные для сети железных дорог России.* Исследования по оценке технико-экономической эффективности систем накопления для системы электроснабжения постоянного тока, выполненные для различных участков железных дорог (Московской, Октябрьской, Свердловской, Западно-Сибирской), показывают, что для решения задач, связанных с повышением пропускной способности, достаточно применения системы накопления в границах лимитирующих межподстанционных зон участка. Номинальные параметры систем накопления определяются рассмотренными выше условиями эксплуатации. Расчетный срок окупаемости таких проектов за счет повышения пропускной способности не превышает трех лет в условиях прогнозируемого роста объемов перевозок [26].

Регулирование зарядной характеристики системы накопления позволяет обеспечить ограничение падения напряжения в контактной сети постоянного тока в пределах до 400 В и поддержание степени заряженности на заданном уровне в рамках цикла работы с электротяговой нагрузкой. Результаты расчетов для графика исполненного движения за отчетные сутки для Свердловской железной дороги при размещении системы на посту секционирования позволяют оценить требуемую номинальную мощность для литийионного накопителя в режиме заряда/разряда на уровне не менее 1,8/3,2 МВт соответственно, энергоемкость — не менее 2,3 МВт·ч [26]. При использовании накопителей другого вида, допускающих глубокий разряд, номинальная мощность существенно снижается до уровня

0,36/3,2 МВт в режиме заряда/разряда соответственно, энергоемкость — до 1,0 МВт·ч.

Характер изменения глубины разряда DoD для однопутных участков аналогичен изменению на двухпутных участках, отличием является рост требуемой номинальной энергоемкости (2,3 МВт·ч), который превышает уровень, требуемый для двухпутных участков, — 1,5 МВт·ч для Октябрьской железной дороги, 1,0 МВт·ч для Свердловской железной дороги [26], 1,3 МВт·ч для Западно-Сибирской железной дороги, 1,2 МВт·ч для Московского центрального кольца Московской железной дороги.

Цикличность режимов заряда/разряда для расчетного пакетного пропуска для системы накопления на однопутном участке железной дороги составляет 1,5 цикла/ч, для исполненного графика движения частота снижается до 0,3 цикла/ч. Для двухпутных участков для условий Московского центрального кольца цикличность составляет менее 0,2 цикла/ч, для условий Октябрьской, Свердловской и Западно-Сибирской железных дорог — около 1...2 циклов/ч [26].

Оценка номинальных значений мощности и энергоемкости систем накопления (табл. 1) приведена для электрохимических накопителей из условия, что токи заряда не превышают уровень $1C_n$, а токи разряда — уровень $2C_n$. Применение других видов накопителей электроэнергии позволяет снизить требования к номинальной энергоемкости систем накопления, применяемых в системе тягового электроснабжения. Условия, для которых получена оценка, соответствуют наиболее тяжелому режиму формирования электротяговой нагрузки: для участков с преобладанием грузового движения — в пакете поездов присутствует поезд

повышенной массы, для пассажирского движения — используется график движения поездов с минимальными интервалами следования.

Снижение уровней электротяговой нагрузки приводит к соответствующему снижению требуемой номинальной мощности и энергоемкости. За исключением задачи регулирования загрузки выпрямительных преобразователей номинальная мощность систем накопления не превышает 2,7 МВт, а номинальная энергоемкость — 2,3 МВт·ч. При регулировании загрузки выпрямительных преобразователей значения номинальной мощности и энергоемкости существенно выше и достигают значений 9,0 МВт и 3,0 МВт·ч соответственно. В большинстве рассмотренных случаев номинальные значения мощности и энергоемкости не превышают уровней 3,0 МВт и 3,0 МВт·ч соответственно.

Постановка задачи. Необходимо оценить энергетические параметры системы накопления электроэнергии для стабилизации напряжения на шинах поста секционирования переменного тока на основе результатов моделирования электротяговой нагрузки. Условия задачи — пакетный пропуск поездов по расчетному графику движения для двух вариантов реализации поста секционирования: пассивного и активного. Решение задачи выполняется для условий горного профиля пути при преобладании грузового движения на двухпутном участке без применения рекуперативного торможения (участок Западно-Сибирской железной дороги).

Описание условий моделирования. Моделирование взаимодействия электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения, содержащей системы накопления электроэнергии, выполняется на основе решения мгновенных схем, позволяющих для заданного графика движения поездов с заданным шагом расчетов получить изменение энергетических показателей.

Имитационная модель для системы тягового электроснабжения основана на схемах замещения силового оборудования тяговой подстанции, тяговой сети и электроподвижного состава.

Для расчетов энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения используются матричные методы (решение мгновенных схем с помощью топологических матриц). Наиболее распространенными среди используемых методов решения являются методы контурных токов и узловых потенциалов.

В матрично-топологических расчетах электрических схем используется понятие обобщенной ветви электрической цепи, которая образована двумя параллельными ветвями — э.д.с. ветви, комплексным сопротивлением или проводимостью ветви и источником

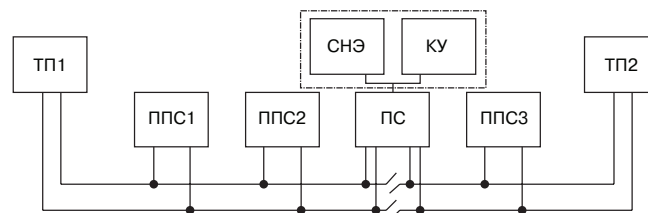


Рис. 1. Структурная схема межподстанционной зоны: ТП1, ТП2 — тяговые подстанции; ППС1–ППС3 — пункты параллельного соединения; ПС — пост секционирования; КУ — компенсирующее устройство; СНЭ — система накопления электроэнергии

Fig. 1. Block diagram of the inter-substation zone: ТП1, ТП2 — traction substations; ППС1–ППС3 — points of parallel connection; ПС — sectioning post; КУ — compensating device; СНЭ — electric storage system

тока. Указанные расчеты применяются в программном комплексе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения» ВНИИЖТ [32]. Результаты расчетов энергетических показателей системы тягового электроснабжения получены на основе имитационного моделирования с интервалом дискретизации, равным 30 с. Оценка параметров системы накопления проиллюстрирована на примере одного из эксплуатационных участков с системой тягового электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ, расположенного в границах Западно-Сибирской железной дороги.

Электротяговая нагрузка получена по результатам тяговых расчетов для локомотивов серии ВЛ80С, которые эксплуатируются на указанном участке. Отсутствие рекуперативного торможения позволяет оценить наиболее тяжелый режим напряжения, в котором рекуперация не оказывает влияния на уровень напряжения. Преобразование пассивного поста секционирования в активный осуществляется путем его подключения к системе внешнего электроснабжения. Это позволяет использовать модель системы накопления с внешней характеристикой, идентичной характеристике тяговой подстанции, и определить максимальные параметры системы при принятии допущений об отсутствии ограничений мощности и энергоемкости.

Структурная схема рассматриваемой межподстанционной зоны приведена на рис. 1.

При проведении моделирования рассматриваются два варианта: вариант, в котором эксплуатируется пассивный пост секционирования с устройством поперечной компенсации, и вариант с активным постом секционирования, подключенным к системе внешнего электроснабжения.

Для определения необходимых параметров системы накопления электроэнергии принимаются допущения, позволяющие существенно упростить расчеты: на начальном этапе расчетов энергоемкость системы не ограничивается; режимы работы системы накопления

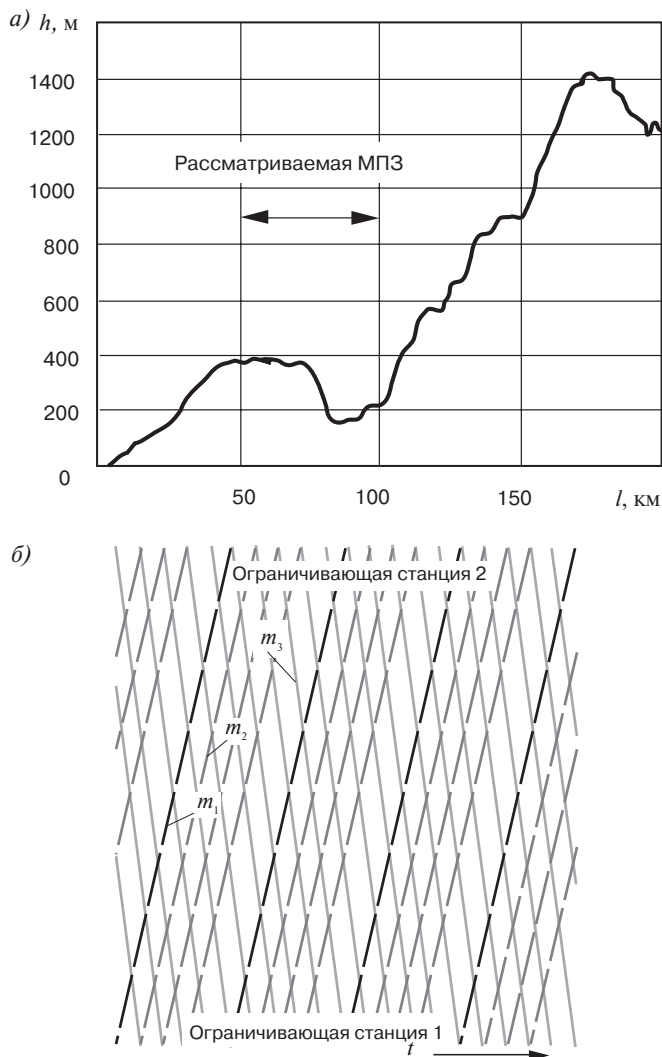


Рис. 2. Приведенный профиль пути (а) и расчетный график движения на рассматриваемом участке (б): h — высота профиля; l — протяженность; МПЗ — межподстанционная зона; m_1 – m_3 — массы поездов; t — время
Fig. 2. Proposed railway track (a) and the estimated traffic graph of the presented section (b): h — profile height; l — length; МПЗ — inter-substation zone; m_1 – m_3 — masses of trains; t — time

моделируются на основе двух расчетов, учитывающих включенное и отключенное состояние системы.

Профиль пути участка железной дороги с границами рассматриваемой межподстанционной зоны и расчетный график движения приведены на рис. 2.

Параметры графика движения, принятые для расчета: пакет состоит из четырех поездов и формируется по схеме «Н–с–с–с» (Н — поезд наибольшей массы $m_1 = 6685$ т; с — поезд средней массы $m_2 = 4190$ т) в одном направлении с интервалом 10 мин; в противоположном направлении — поток поездов с интервалом 12 мин (поезд средней массы $m_3 = 6490$ т). Ука-

занная схема пропуска поездов рассматривается при проверке энергетических показателей системы тягового электроснабжения на участках инфраструктуры, где обращаются поезда повышенной массы, а также для расчета пропускной способности.

На рассматриваемом участке контактная подвеска выполнена из проводов и тросов ПБСМ-70+МФ-100, рельсовая сеть — двухпутный участок с межпутными соединителями, рельсы типа Р65. Тип профиля пути на межподстанционной зоне — II, расчетный уклон составляет 9 ‰. Выбранная межподстанционная зона относится к одной из лимитирующих на участке.

Результаты расчетов. Для оценки энергетических показателей системы тягового электроснабжения тяговые расчеты выполнены для серий локомотивов, обращающихся на рассматриваемом участке (ВЛ80^с). Отсутствие систем рекуперативного торможения на эксплуатируемых сериях электропоездов позволяет рассмотреть наиболее тяжелые условия работы системы тягового электроснабжения при пропуске пакетов поездов в направлении наибольшего электропотребления и потока поездов средней массы во встречном направлении. Результаты тяговых расчетов для четного и нечетного направления для поездов с максимальной и средней массой приведены на рис. 3, где схематично указаны координаты расположения тяговых подстанций ТП1 и ТП2, ограничивающих рассматриваемую межподстанционную зону.

Режимы работы системы накопления. Результаты моделирования показывают, что при реализации расчетной схемы пропуска поездов напряжение на шинах поста секционирования при наличии устройства компенсации снижается ниже уровня 21 кВ и достигает 19 кВ. Проведенные измерения напряжения на посту секционирования (с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Омск») показали, что уровень минимального напряжения на шинах поста в условиях эксплуатации (более легких условий формирования электротяговой нагрузки по сравнению с расчетными) достигает значений 21,5 кВ при отсутствии средств компенсации и уровня 23,0 кВ при работе регулируемого устройства компенсации типа СГРМ с максимальной мощностью до 6,7 Мвар [33, 34]. Регулируемые устройства компенсации реактивной мощности, получившие распространение на сети железных дорог, относятся к типу СГРМ или СТК, отличающихся способом регулирования. Если в первом типе устройств регулирование осуществляется за счет изменения тока в ветви с реактором, то во втором — за счет регулирования тока в ветви, содержащей батарею конденсаторов. Основным преимуществом указанных устройств является плавное

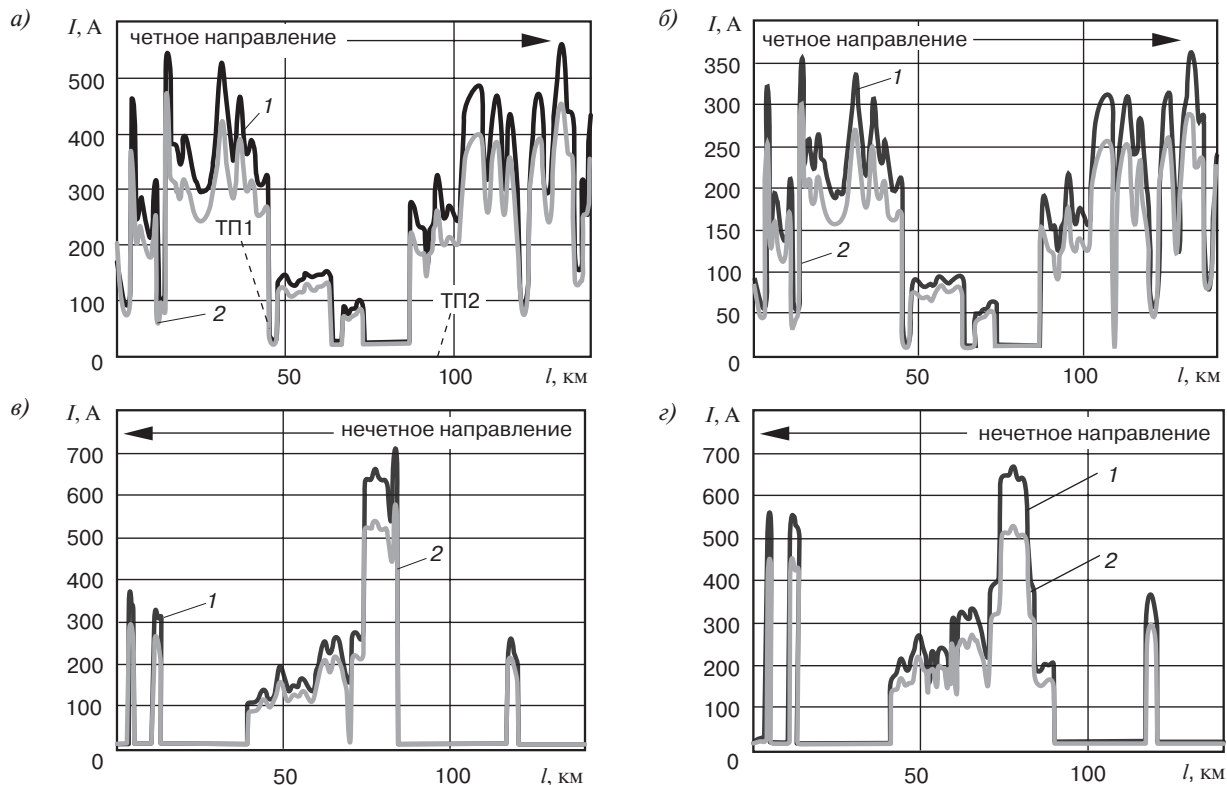


Рис. 3. Расчетные графики потребляемого тока I для поездов «Н» и «с» в четном (а, б) и нечетном (в, г) направлении соответственно: 1 — полный ток; 2 — активный ток

Fig. 3. Estimated graphs of the I consumed current for “H” and “c” trains in the even (a, b) and odd (c, d) direction, respectively: 1 — total current; 2 — active current

регулирование реактивной мощности и отсутствие явления перекомпенсации.

Результаты моделирования позволяют определить уровень напряжения на шинах поста секционирования в двух состояниях — активном и пассивном (рис. 4).

По результатам моделирования активная мощность поста секционирования изменяется в диапазоне от 9,7 до 15,0 МВт (рис. 5), реактивная — от 7,6 до 14,6 Мвар.

Наблюдаемые области значений полного тока по плечам питания и суммарного тока активного поста секционирования на диаграмме в полярных координатах показывают, что фазовые углы тока относительно напряжения преимущественно находятся в диапазоне от -30 до -60° (рис. 6).

Повышение коэффициента мощности системы накопления за счет управления преобразователями позволяет снизить требования к номинальной мощности и энергоемкости, а компенсацию реактивной мощности выполнить с помощью регулируемых устройств. Это, в свою очередь, позволяет снизить стоимость оборудования активного поста секционирования за счет более низкой стоимости средств компенсации и, кроме этого, решать задачи оптимальной работы двух устройств по

регулированию напряжения на шинах поста секционирования и повышению качества электроэнергии.

Оценка уровня компенсации реактивной мощности.

Результаты эксплуатации современных устройств поперечной компенсации реактивной мощности (6–8 Мвар) [33–35] показывают компенсацию напряжения в контактной сети около 2 кВ. Для поста секционирования мощность устройств компенсации определяется исходя из входных сопротивлений и требуемого значения компенсации падения напряжения в контактной сети [35–37].

Использование устройств компенсации совместно с системами накопления позволяет снизить требования к мощности и энергоемкости систем. В рассматриваемом случае при пакетном пропуске поездов потребляемая на посту секционирования реактивная мощность находится в диапазоне от 8 до 12 Мвар. Активная потребляемая мощность системы накопления для заданных условий формирования электротяговой нагрузки находится в диапазоне от 10 до 14 МВт. Перевод пассивного поста секционирования в активный совместно с компенсацией реактивной мощности позволяет компенсировать падение напряжения в контактной сети на 5 кВ (с 19 до 24 кВ).

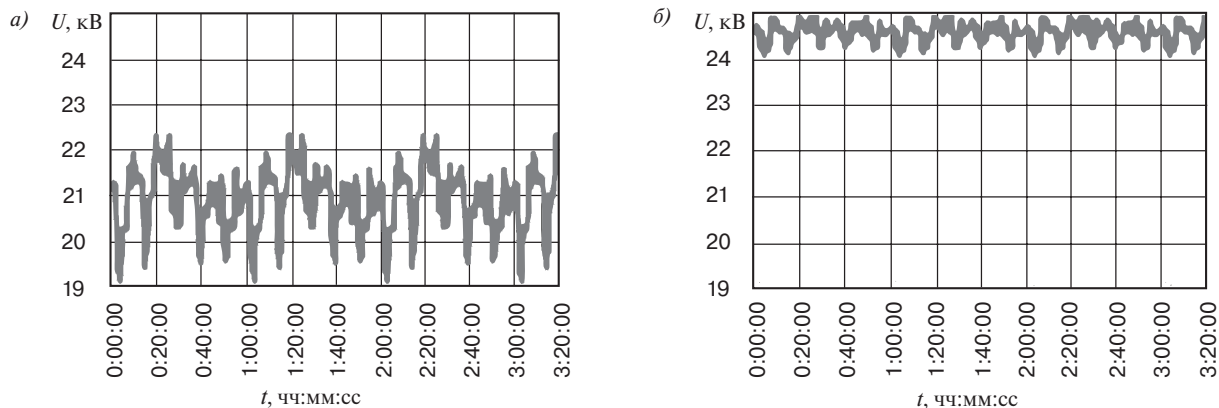


Рис. 4. График напряжения U на шинах поста секционирования:
 а — при пассивном режиме; б — при активном режиме

Fig. 4. Graph of the U voltage on the buses of the sectioning post:
 а — in the passive mode; б — in active mode

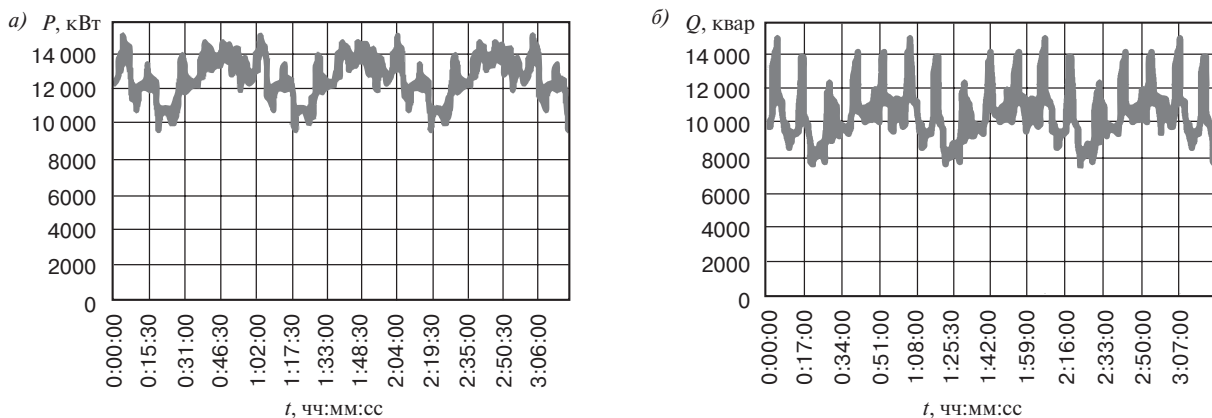


Рис. 5. Мощность активного поста секционирования:
 а — активная P ; б — реактивная Q

Fig. 5. Power of the active sectioning post:
 а — P active; б — Q reactive

Применение результатов расчетов для определения графика степени заряженности. Расчеты основаны на имитационном моделировании для двух вариантов работы поста секционирования. Расчет показателей системы накопления электроэнергии выполняется в три этапа. На начальном этапе выполняются расчеты для первого (для условий пассивного поста секционирования) и второго (для условий активного поста секционирования) вариантов. Второй вариант используется при расчетах, соответствующих смене состояния поста секционирования с пассивного на активное. На следующем этапе формируется синтезированный вариант расчетов, который позволяет определить энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения. На третьем этапе для расчета показателей работы системы накопления на основе синтезированного варианта определяется степень заряженности, учитывающая предысторию режимов работы.

Изменение состояния поста секционирования, соответствующее режиму работы системы накопления, выполняется при снижении уровня напряжения на шинах ниже 21 кВ. При снижении напряжения ниже указанного уровня выполняется имитация работы активного поста секционирования, для чего используются результаты расчетов для второго варианта. При повышении напряжения выше уровня 21 кВ вновь используются результаты расчетов для первого варианта и т. д.

В обоих вариантах вычисления степени заряженности используются результаты расчетов по мгновенным схемам на промежутке времени более 3 ч с шагом 30 с. На основании расчетов строится график степени заряженности системы накопления исходя из текущих значений тока, напряжения и КПД системы на уровне 0,9. При пропуске пакета поездов с поездом повышенной массы для рассматриваемого участка создаются условия для преобладания разряда в графике степени заряженности. При реализации зарядной

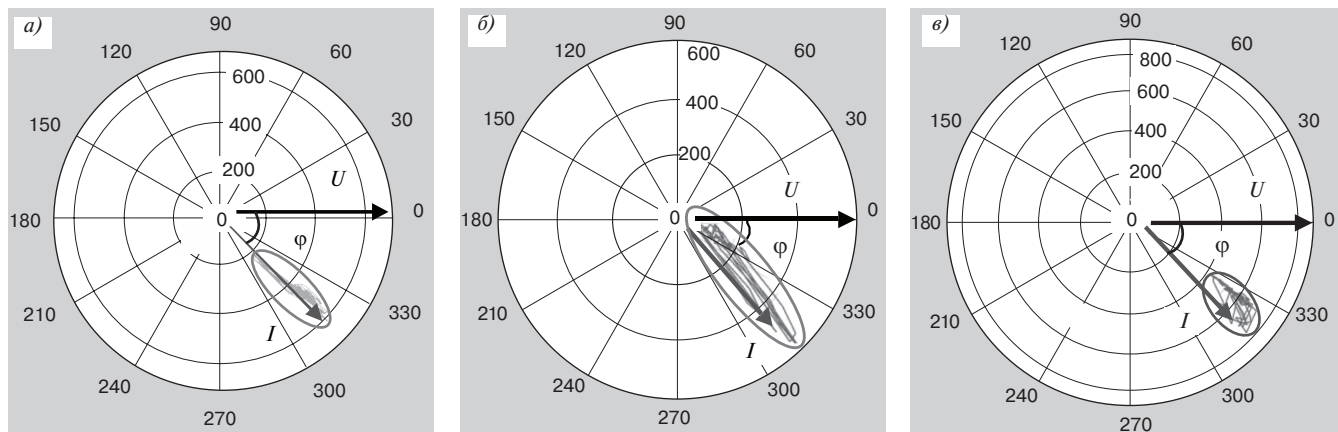


Рис. 6. Фазовые диаграммы тока для активного поста секционирования:

а — левого плеча; б — правого плеча; в — обоих плеч

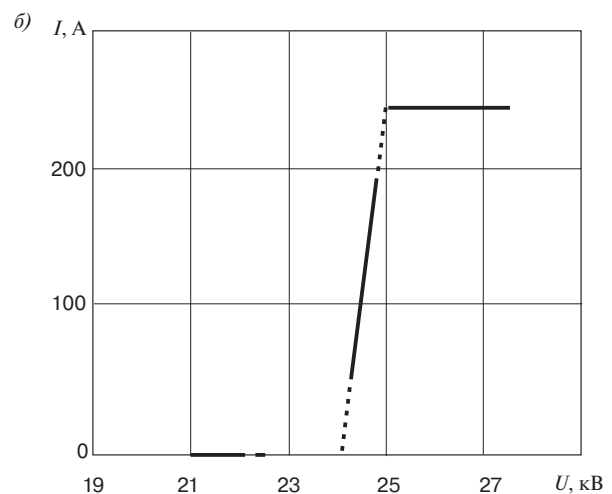
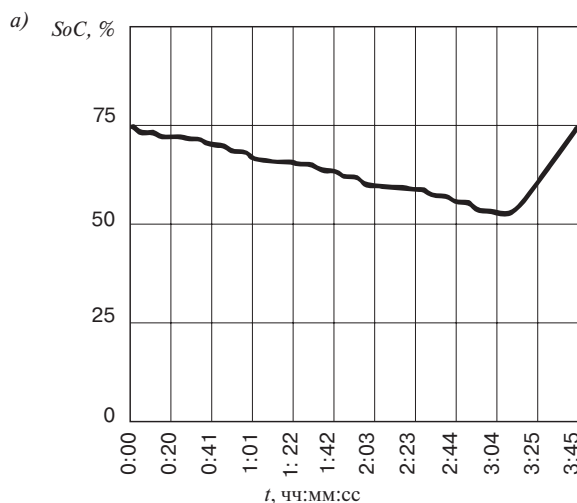
Fig. 6. Phase diagrams of the current for the active sectioning post:

а — left shoulder; б — right shoulder; в — both shoulders

характеристики для компенсации разряда обеспечивается заряд суммарным током на уровне 250 А при превышении уровня напряжения на шинах свыше 25 кВ (рис. 7), а в диапазоне от 24 до 25 кВ ток изменяется от 0 до 250 А по линейной характеристике.

Увеличение номинальной энергоемкости позволяет снизить глубину разряда для рассматриваемых условий формирования электротяговой нагрузки, и при возможности глубокого разряда номинальная энергоемкость системы составляет 1,0 МВт·ч. В случае ограничения глубины разряда до 30 % (для электрохимических видов накопителей) номинальная энергоемкость системы увеличивается до уровня 12,0 МВт·ч (рис. 8).

Обсуждение результатов. Выполненные расчеты позволяют сравнить полученные для постов секционирования результаты на участках постоянного и переменного тока. Для условий Октябрьской, Свердловской, Московской и Западно-Сибирской железных дорог (табл. 1) номинальная мощность системы накопления с электрохимическими источниками не превышает 2,7 МВт (мощность разряда определяется кратностью 2), для участков переменного тока (Западно-Сибирская железная дорога) — 6,3 МВт, а с учетом обеспечения номинальной разрядной мощности на уровне 15 МВт и кратности разряда, равной 2, мощность должна быть увеличена до 7,5 МВт (табл. 2). Требуемая номинальная энергоемкость

Рис. 7. График степени заряженности SoC для расчетной тяговой нагрузки (а) и зарядная характеристика системы накопления $I = f(U)$ на посту секционирования (б)Fig. 7. Graph of the SoC expected charge for the calculated traction load (а) and the $I = f(U)$ charging feature of the accumulation system at the sectioning post (б)

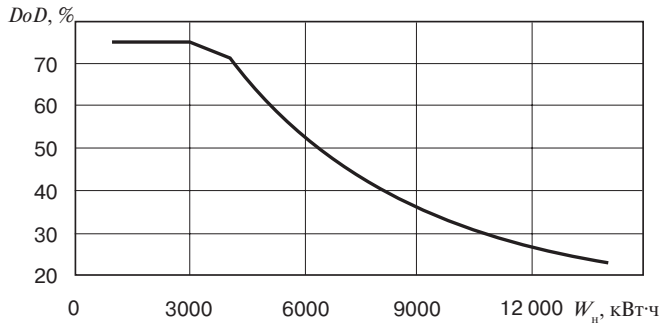


Рис. 8. Зависимость глубины разряда DoD от номинальной энергоемкости W_n
Fig. 8. Dependence of the DoD depth of discharge on the W_n nominal energy capacity

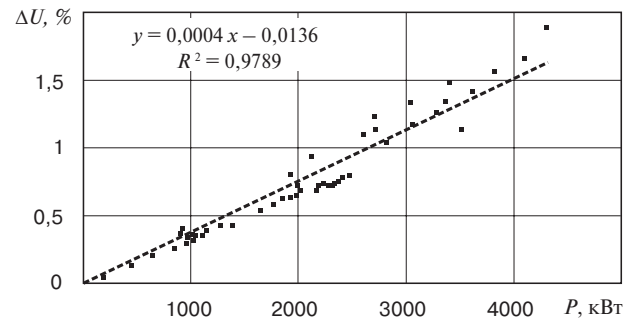


Рис. 9. Зависимость приращения напряжения ΔU от активной мощности P
Fig. 9. Dependence of the ΔU voltage increment on the P active power

для участков постоянного тока составляет 2,3 МВт·ч (табл. 1), для участка переменного тока — 12,0 МВт·ч (табл. 2).

При линейной интерполяции результатов соответствующий коэффициент функции $I = f(U)$ будет определяться по формуле

$$k = \frac{U_{\text{ш}}^{\text{вар}2} - U_{\text{ш}}^{\text{вар}1}}{I_{\text{ПС}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ш}}^{\text{вар}1}$, $U_{\text{ш}}^{\text{вар}2}$ — напряжения на шинах поста секционирования, В, рассчитанные для первого и второго вариантов соответственно; $I_{\text{ПС}}$ — активный ток поста секционирования, А.

Таблица 2

Параметры и условия работы системы накопления для участков переменного тока

Table 2

Parameters and operating conditions of the accumulation system for AC sections

Условия работы и параметры	Западно-Сибирская ж. д.
Место размещения	ПС
Кол-во путей	2
Вид движения	Грузовое
Показатель нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения	U_{min}
$P_{\text{нз}} / P_{\text{нр}}$, МВт	7,5/15,0
$W_{\text{н min}} / W_{\text{н max}}$, МВт·ч	1,0/12,0

Примечания: $P_{\text{нз}}$, $P_{\text{нр}}$ — номинальная мощность заряда и разряда соответственно; $W_{\text{н min}}$, $W_{\text{н max}}$ — минимальный и максимальный уровень номинальной энергоемкости соответственно.

Notes: $P_{\text{нз}}$, $P_{\text{нр}}$ — rated power of charge and discharge, respectively; $W_{\text{н min}}$, $W_{\text{н max}}$ — minimum and maximum levels of the nominal energy intensity, respectively.

Задав минимальный уровень напряжения на шинах поста секционирования, определяем требуемую активную мощность поста по уравнению линейной интерполяции:

$$P_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{min}}(U_{\text{min}} - U_i)}{k}, \quad (2)$$

где U_{min} , U_i — минимальное напряжение и текущее напряжение на шинах поста секционирования ниже минимального соответственно.

Построенный по результатам расчетов график изменения напряжения в зависимости от мощности поста секционирования позволяет оценить градиент приращения напряжения, который составил около 0,4 кВ/МВт (рис. 9).

Представленный эффект повышения напряжения на шинах поста секционирования получен для условий одновременной компенсации на них реактивной мощности.

Результаты оценки энергетических параметров системы накопления для решения задачи стабилизации уровня напряжения на шинах поста секционирования переменного тока, где одним из ключевых показателей нагрузочной способности системы тягового электро-снабжения выступает минимальное напряжение U_{min} (табл. 2), показывают их большие значения по сравнению со значениями, полученными при решении аналогичной задачи для участков постоянного тока, что обусловлено спецификой системы тягового электро-снабжения переменного тока.

Для адекватного сравнения следует использовать удельные характеристики, например удельную мощность и энергоемкость систем накопления на единицу протяженности межподстанционной зоны. Для системы тягового электроснабжения постоянного тока удельные значения мощности и энергоемкости для средней протяженности межподстанционной зоны

около 15 км составят 0,2 МВт/км и 0,2 МВт·ч/км соответственно, а для системы тягового электроснабжения переменного тока при средней протяженности межподстанционной зоны около 50 км — 0,15 МВт/км и 0,24 МВт·ч/км соответственно. Сравнение усредненных значений показывает меньшую удельную мощность и большую удельную энергоемкость для систем накопления на участках переменного тока. Оценка погонной мощности и энергоемкости получена для межподстанционной зоны, профиль пути которой относится к II типу, на участке с преобладанием грузового движения и обращения поездов повышенной массы.

Таким образом, для постов секционирования на участке переменного тока мощность систем накопления в режимах заряда/разряда в абсолютном выражении превышает аналогичную на участке постоянного тока более чем в два раза, а энергоемкость — более чем в пять раз (при ограничении глубины разряда до 30 %). В удельном выражении параметры систем накопления для сравниваемых условий сопоставимы.

Заключение. Выполненные для двух вариантов системы тягового электроснабжения расчеты для определения энергетических показателей позволяют синтезировать график нагрузки и напряжения на посту секционирования и на его основе оценить номинальные параметры и условия работы систем накопления в зависимости от выбранных пороговых напряжений и зарядной характеристики, учитывающей падение напряжения в контактной сети.

Использование систем накопления электроэнергии на постах секционирования совместно с устройствами поперечной компенсации делает возможным снижение номинальных параметров данных систем. Результаты оценки абсолютных и удельных значений мощности и энергоемкости показывают, что системы накопления в границах межподстанционных зон на участках переменного тока, профиль пути которых относится к типу II, в условиях преобладания грузового движения и высокой интенсивности перевозок являются более мощными и энергоемкими. В то же время при сравнении удельных значений мощности и энергоемкости к протяженности межподстанционных зон параметры систем накопления на участках переменного и постоянного тока сопоставимы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A Load Flow Analysis for AC/DC Hybrid Distribution Network Incorporated with Distributed Energy Resources for Different Grid Scenarios / O. Khan [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, issue 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/en11020367>.
2. Wind power fluctuation compensation by variable speed pumped storage plant in a grid integrated system: Frequency spectrum analysis / Minxiao Han [et al.] // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2019. Vol. 7, issue 2. P. 381–395. <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2018.00580>.
3. Service restoration strategy of AC/DC hybrid distribution networks / Lou Chengwei [et al.] // *The Journal of Engineering*. 2019. Jan. P. 1–6. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8508>.
4. Optimal Sizing and Energy Management of Microgrids with Vehicle-to-Grid Technology: A Critical Review and Future Trends / O. Ouramdane [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14 (14). P. 1–45. <https://doi.org/10.3390/en14144166>.
5. Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices / M.V. Shevlyugin [et al.] // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, no. 9. P. 552–556. <https://doi.org/10.3103/S1068371220090114>.
6. Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives / O.S. Valinsky [et al.] // *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, no. 10. P. 604–608. <https://doi.org/10.3103/S1068371220100119>.
7. Не́зевак В.Л. Расчет параметров и показателей работы системы накопления электроэнергии на участках с рекуперативным торможением электроподвижного состава // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 1 (81). С. 149–160. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_149.
8. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers / An Luo [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26 (10). P. 2844–2856. <https://doi.org/10.1109/tpel.2011.2128888>.
9. Electric railway smart microgrid system with integration of multiple energy systems and power-quality improvement / Chen Feng [et al.] // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107459>.
10. An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway / Junyu Chen [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. March. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2020.2980018>.
11. Грузовой электровоз 2ЭС7 «Уральские локомотивы» [Электронный ресурс]. URL: <https://ulkm.ru/produkcija/gruzovoj-elektrovoz-2es7> (дата обращения: 15.11.2021).
12. Новый магистральный электровоз 2ЭС7 для тяжеловесного движения // *Мир транспорта*. 2017. № 1 (68). С. 75.
13. IGCT — появление новой технологии для сверхмощных экономически эффективных преобразователей / Р.К. Steimer [и др.] // *Электротехника*. 1999. № 4. С. 10–18.
14. Крюков А.В., Черепанов А.В., Шафиков А.Р. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог при движении локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2018. № 4 (60). С. 99–108. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4\(60\).99-108](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108).
15. Юдина Н.Ю., Брусенцова О.Ю., Пупынин В.Н. Усиление системы тягового электроснабжения участков железных дорог, электрифицированных на постоянном токе 3,3 кВ, путем перевода на переменный ток 25 кВ с реализацией схемы распределенного питания // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 2. С. 42–45.
16. Патент № 47152 Российская Федерация, МПК H02P 13/06, H01F 29/02. Трансформаторный агрегат с регулированием напряжения для электрифицированных железных дорог переменного тока: № 2005114442/22: заявл. 11.05.2005; опубл. 10.08.2005 / Аржанников Б.А., Пышкин А.А., Григорьев В.Ф. 12 с.
17. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока / Л.А. Герман [и др.] // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2014. № 1. С. 47–54.
18. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2016. № 1. С. 13–16.

19. Титова Т.С., Евстафьев А.М., Никитин В.В. Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава // *Электротехника*. 2018. № 10. С. 21–25.
20. Незевак В.Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный информационный сборник. 2020. № 9. С. 17–23. <https://doi.org/10.36535/023619142020094>.
21. Шапшал А.С., Зак В.В., Некрасов Е.В. Определение расхода электроэнергии на тягу грузовых поездов в условиях сложного профиля пути // *Инновации, перспективы развития локомотиво- и вагоностроения: сб. тр. молодых ученых, докторантов и аспирантов*; под ред. И.С. Морозкина. Ростов н/Д: Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2008. С. 28–32.
22. Гвоздик Е.А. Исследование влияния профиля пути на расход энергии в метрополитене // *Вопросы развития мировых научных процессов: Междунар. научн.-практ. конф. (Кемерово, 15 марта 2019 г.)*. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2019. С. 55–57.
23. Ушаков С.Ю., Вильгельм А.С., Никифоров М.М. Оценка эффективности использования электроэнергии на тягу поездов в границах полигона Московского Центрального кольца // *Вестник транспорта Поволжья*. 2019. № 5 (77). С. 40–49.
24. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Ushakov S.Y. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 3–4 October 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8602528. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602528>.
25. Tretyakov E.A., Cheremisin V.T., Golovnev G.E. Re-configuration of intelligent electrical distribution networks of railways // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Vol. 760: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019)*, Moscow, 12–15 November 2019. Moscow: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012059>.
26. Незевак В.Л. Условия работы системы накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении постоянного тока однопутных участков железных дорог // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2021. Т. 80, № 4. С. 216–224. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>.
27. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б.А. Аржанников [и др.] // *Электротехника*. 2016. № 9. С. 51–57.
28. Влияние интервала движения на вероятность межпоездного обмена энергией рекуперации в метрополитене / К.И. Куликов [и др.] // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2017. № 2 (35). С. 53–60. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-53-60>.
29. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л.М. Клячко [и др.] // *Электротехника*. 2021. № 9. С. 22–25.
30. Erhan K., Özdemir E. Prototype production and comparative analysis of high-speed flywheel energy storage systems during regenerative braking in hybrid and electric vehicles // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 43. P. 103237. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103237>.
31. Battery degradation minimization oriented energy management strategy for plug-in hybrid electric bus with multi-energy storage system / Jiuyu Du [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165. P. 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.084>.
32. Марский В.Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2014. № 1. С. 40–46.
33. Черемисин В.Т., Никонов А.В. Оценка энергоэффективности статического генератора реактивной мощности // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2016. № 2 (62). С. 128–134.
34. Черемисин В.Т., Никонов А.В. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования // *Транспорт Урала*. 2018. № 1 (56). С. 30–34.
35. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка на посту секционирования контактной сети / Л.А. Герман [и др.] // *Интеллектуальная электротехника*. 2021. № 3 (15). С. 23–36. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_23.
36. Кондратьев Ю.В., Тарасенко А.В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности // *Известия Транссиба*. 2015. № 2 (22). С. 79–87.
37. Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2018. Т. 77, № 5. С. 288–294. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.

REFERENCES

1. Khan O., Jamali S.Z., Noh Ch., et al. A Load Flow Analysis for AC/DC Hybrid Distribution Network Incorporated with Distributed Energy Resources for Different Grid Scenarios. *Energies*. 2018;11(2):1–15. <https://doi.org/10.3390/en11020367>.
2. Han M., Bitew G.T., Mekonnen S.A., Yan W. Wind power fluctuation compensation by variable speed pumped storage plant in a grid integrated system: Frequency spectrum analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2019;7(2):381–395. <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2018.00580>.
3. Lou Chengwei, Zhang Lu, Zhang Xiaohui et al. Service restoration strategy of AC/DC hybrid distribution networks. *The Journal of Engineering*. 2019;(Jan.):1–6. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8508>.
4. Ouramdane O., Elbouchikhi E., Amirat Ya., Sedgh Gooya E. Optimal Sizing and Energy Management of Microgrids with Vehicle-to-Grid Technology: A Critical Review and Future Trends. *Energies*. 2021;14(14):1–45. <https://doi.org/10.3390/en14144166>.
5. Shevlyugin M.V., Golitsyna A.E., Belov M.N., Pletnev D.S. Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(9):552–556. <https://doi.org/10.3103/S1068371220090114>.
6. Valinsky O.S., Titova T.S., Nikitin V.V., Evstafev A.M. Modeling Onboard Energy Storage Systems for Hybrid Traction Drives. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(10):604–608. <https://doi.org/10.3103/S1068371220100119>.
7. Nezevak V.L. Raschet parametrov i pokazateley raboty sistemy nakopleniya elektroenergii na uchastkakh s rekuperativnym tormozheniem elektropodvizhnogo sostava [Calculation of parameters and indicators of the operation of the system of accumulation of electricity in areas with regenerative braking of electric rolling stock]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2021;1(81):149–160. https://doi.org/10.46973/0201-727X_2021_1_149. (In Russ.).
8. Luo A., Wu Ch., Shen J., et al. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011;26(10):2844–2856. <https://doi.org/10.1109/tpel.2011.2128888>.
9. Feng Ch., Gao Zh., Sun Ya., Chen P. Electric railway smart microgrid system with integration of multiple energy systems and power-quality improvement. *Electric Power Systems Research*. 2021;(199):1–13. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107459>.
10. Chen J., Hu H., Wang K., et al. An Energy Storage System for Recycling Regenerative Braking Energy in High-Speed Railway.

IEEE Transactions on Power Delivery. 2020;(March):1–10. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2020.2980018>.

11. Gruzovoy elektrovov 2ES7 “Ural'skie lokomotivy” [Freight electric locomotive 2ES7 “Ural locomotives”]. URL: <https://ulkm.ru/produkciya/gruzovoy-elektrovov-2es7> (access date: 15.11.2021). (In Russ.).

12. Novyy magistral'nyy elektrovov 2ES7 dlya tyazhelovesnogo dvizheniya [New mainline electric locomotive 2ES7 for heavy haul traffic]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2017;1(68):75. (In Russ.).

13. Steimer P. K., Gruning H. E., Werninger J., et al. IGCT — poyavleniye novoy tekhnologii dlya sverkhmoshchnykh ekonomicheskikh effektivnykh preobrazovateley [IGCT — emergence of a new technology for high-power cost-effective converters]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 1999;(4):10–18. (In Russ.).

14. Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Shafikov A. R. Modelirovaniye nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog pri dvizhenii lokomotivov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Modeling of non-sinusoidal regimes in railway power supply systems during the operation of locomotives with asynchronous traction motors]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2018;(60):99–108. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4\(60\).99-108](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.4(60).99-108). (In Russ.).

15. Yudina N. Yu., Brusentsova O. Yu., Pupynin V. N. Usileniye sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastkov zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na postoyannom toke 3,3 kV, putem perevoda na peremennyy tok 25 kV s realizatsiyey skhemy raspredelennoy pitaniya [Strengthening the traction power supply system for railway sections electrified at 3.3 kV DC by transferring to 25 kV AC with the implementation of a distributed power scheme]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' = Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*. 2015;(2):42–45. (In Russ.).

16. Arzhannikov B. A., Pyshkin A. A., Grigor'ev V. F. Transformatornyy agregat s regulirovaniyem napryazheniya dlya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka [Transformer assembly with voltage regulation for electrified AC railways]. Patent no. 47152 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK H02P 13/06, H01F 29/02, publ. 08.10.2005, 12 p. (In Russ.).

17. German L. A., Serebryakov A. S., Ermolenko D. V., et al. Ustanovki poperechnoy emkostnoy kompensatsii s fil'tratsiyey i dempfirovaniyem vysshikh garmonik v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Installations for capacitive shunt compensation with filtration and damping of higher harmonics within the AC traction networks]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2014;(1):47–54. (In Russ.).

18. Shtang A. A., Yaroslavtsev M. V. Kontaktno-akkumulyatornyy manevrovyy elektrovov s nakopitelem energii na osnove litii-ionnykh akkumulyatorov [Contact-battery shunting electric locomotive with an energy storage device based on lithium-ion batteries]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta = Electronics and electrical equipment of transport*. 2016;(1):13–16. (In Russ.).

19. Titova T. S., Evstaf'ev A. M., Nikitin V. V. Primeneniye nakopiteley energii dlya povysheniya energeticheskoy effektivnosti tyagovogo podvizhnogo sostava [Application of energy storage devices to improve the energy efficiency of traction rolling stock]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2018;(10):21–25. (In Russ.).

20. Nezevak V. L. Sravneniye variantov primeneniya nakopiteley elektroenergii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya i na elektropodvizhnom sostave [Comparison of options for the use of energy storage devices in the traction power supply system and on electric rolling stock]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik = Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2020;(9):17–23. <https://doi.org/10.36535/023619142020094>. (In Russ.).

21. Shapshal A. S., Zak V. V., Nekrasov E. V. Opredeleniye raskhoda elektroenergii na tyagu gruzovykh poezdov v usloviyakh slozhnogo pro-

fil'ya puti [Determination of electricity consumption for traction of freight trains in conditions of a complex track profile]. *Innovatsii, perspektivy razvitiya lokomotivo- i vagonostroeniya: sb. tr. molodykh uchenykh, doktorantov i aspirantov; pod red. I. S. Morozkina [Innovations, prospects for the development of locomotive and car building: Coll. of proceedings of young scientists, doctoral students and graduate students; ed. by I. S. Morozkin]*. Rostov-on-Don: Rostovskiy gos. un-t putey soobshcheniya [Rostov state Transport University] Publ.; 2008. P. 28–32. (In Russ.).

22. Gvozdk E. A. Issledovaniye vliyaniya profilya puti na raskhod energii v metropolitene [Study of the influence of the track profile on energy consumption in the subway]. *Voprosy razvitiya mirovykh nauchnykh protsessov: Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (Kemerovo, 15 marta 2019 g.) [Issues of the development of world scientific processes: International scientific and practical conference (Kemerovo, March 15, 2019)]*. Kemerovo: Zapadno-Sibirskiy nauchnyy tsentr [West Siberian Scientific Center] Publ.; 2019. P. 55–57. (In Russ.).

23. Ushakov S. Yu., Vil'gel'm A. S., Nikiforov M. M. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya elektroenergii na tyagu poezdov v granitsakh poligona Moskovskogo Tsentral'nogo kol'tsa [Evaluation of the efficiency of using electricity for train traction within the boundaries of the Moscow Central Circle test site]. *Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2019;5(77):40–49. (In Russ.).

24. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Ushakov S. Y. Assessment of Train Traction Electric Energy Losses. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, October 3–4, 2018. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. P. 8602528. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602528>.

25. Tretyakov E. A., Cheremisin V. T., Golovnev G. E. Reconfiguration of intelligent electrical distribution networks of railways. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Vol. 760: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019), Moscow, November 12–15, 2019. Moscow: IOP Publishing Ltd; 2020. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012059>.

26. Nezevak V. L. Usloviya raboty sistemy nakopleniya elektroenergii v tyagovom elektrosnabzhenii postoyannogo toka odnopusnykh uchastkov zheleznykh dorog [Operating conditions of electric energy storage system in DC traction power supply for single-track sections of railways]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2021;80(4):216–224. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-4-216-224>. (In Russ.).

27. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T., et al. Sovershenstvovaniye osnovnykh trebovaniy k sisteme i ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Improvement of the main requirements for the system and devices of DC traction power supply]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2016;(9):51–57. (In Russ.).

28. Kulikov K. I., Spiridonov E. A., Ponomarev K. E., Lange-man E. G. Vliyaniye intervala dvizheniya na veroyatnost' mezhpoezdnoy obmena energiyey rekuperatsii v metropolitene [Influence of the interval of movement on the probability of inter-train exchange of recuperation energy in the subway]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii = Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*. 2017;2(35):53–60. <https://doi.org/10.17212/1727-2769-2017-2-53-60>. (In Russ.).

29. Klyachko L. M., Shevlyugin M. V., Belov M. N., Golitsyna A. E. Model' sovmeshchennoy tyagovoy podstantsii metropolitena s ucheto tyagovoy nagruzki i potrebiteley sobstvennykh nuzhd [Model of a combined traction substation of the subway, taking into account the traction load and consumers of their own needs]. *Elektrotehnika = Russian Electrical Engineering*. 2021;(9):22–25. (In Russ.).

30. Erhan K., Özdemir E. Prototype production and comparative analysis of high-speed flywheel energy storage systems during regenerative braking in hybrid and electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2021;(43):103237. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103237>.

31. Du J., Zhang X., Wang T., et al. Battery degradation minimization oriented energy management strategy for plug-in hybrid electric bus with multi-energy storage system. *Energy*. 2018;(165):153–163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.084>.

32. Marskiy V.E. Opredelenie propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroystvam tyagovogo elektrosnabzheniya [Determination of the throughput capacity of railway sections by traction power supply devices]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2014;(1):40–46. (In Russ.).

33. Cheremisin V.T., Nikonov A.V. Otsenka energoeffektivnosti staticheskogo generatora reaktivnoy moshchnosti [Evaluation of the energy efficiency of a static reactive power generator]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2016;2(62):128–134. (In Russ.).

34. Cheremisin V.T., Nikonov A.V. Sravnenie energeticheskikh pokazateley reguliruemyykh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v usloviyakh ekspluatatsii na postakh sektionirovaniya [Comparison of energy indicators of adjustable devices for transverse reactive power compensation in operating conditions at sectioning stations]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2018;1(56):30–34. (In Russ.).

35. German L.A., Goncharenko V.P., Karabanov A.A., Kovtun A.V. Perekluchayemaya fil'trokompensiruyushchaya ustanovka na postu sektionirovaniya kontaktnoy seti [Switchable filter-compensating installation at the sectioning post of the contact network]. *Intellektual'naya elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*. 2021;3(15):23–36. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_23. (In Russ.).

36. Kondrat'ev Yu.V., Tarasenko A.V. Vybora moshchnosti i mesta razmeshcheniya ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Choice of power and placement of devices for transverse reactive power compensation]. *Izvestiya Transsiba = Proceedings of Transsib*. 2015;2(22):79–87. (In Russ.).

37. German L.A. Effektivnost' reguliruemyykh malostupenchatykh fil'trokompensiruyushchikh ustanovok v tyagovoy seti peremennogo toka

[Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2018;77(5):288–294. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Владислав Леонидович НЕЗЕВАК,

канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ОмГУПС», AuthorID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladislav L. NEZEVAK,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, FGBOU VO "OmGUPS", AuthorID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

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

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

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

Статья поступила в редакцию 06.12.2021, первая рецензия получена 08.12.2021, вторая рецензия получена 24.12.2021, принята к публикации 27.12.2021.

The article was submitted 06.12.2021, first review received 08.12.2021, second review received 24.12.2021, accepted for publication 27.12.2021.

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).

Научная статья

УДК 629.014

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-53-62



СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАВАЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А. Г. Силюта¹✉, А. Г. Силюта², Д. М. Маяков³¹ Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация² Научно-исследовательский испытательный центр железнодорожных войск
Министерства обороны Российской Федерации (НИИЦ ЖДВ),
Москва, Российская Федерация³ Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время разработка новых локомотивов ведется с учетом условий эксплуатации с последующим закреплением локомотива на целевом полигоне. Для оценки стоимости жизненного цикла на этапе проектирования производители железнодорожного тягового подвижного состава разрабатывают расчетные эксплуатационные модели работы локомотива с оценкой ключевых показателей. Таким образом, оценка эффективности тягового подвижного состава с проектными характеристиками на целевом полигоне является основной информацией для принятия управленческих решений о закупке локомотивов выбранной серии. Подобная задача поставлена и решается для транспортных средств других видов транспорта с учетом условий эксплуатации, особенностей конструкции и т. д.

Материалы и методы. Современные подходы к оценке эффективности создаваемых транспортных средств используются для решения разных задач, однако в ряде случаев удается применить схожие критерии, отличающиеся механизмом расчета и объемом исходных данных, что особенно важно при оценке эффективности мультимодальных перевозок как в грузовом, так и в пассажирском движении. Приведенный в статье критический анализ основных подходов к оценке эффективности создаваемых транспортных средств крупнейших видов транспорта, таких как автомобильный, водный и железнодорожный, позволил сделать вывод о необходимости учета не только коэффициента полезного действия транспортного средства, но и интенсивности его использования.

Результаты. В качестве примера получены количественные оценки предлагаемого критерия эффективности по паспортным характеристикам и с учетом реальных условий эксплуатации. Сравнение результатов моделирования с результатами расчетов по паспортным характеристикам показало значительное влияние условий эксплуатации на величину критерия эффективности.

Обсуждение и заключение. Полученные выводы являются универсальными и могут быть рекомендованы к применению для оценки эффективности создаваемых транспортных средств различных видов транспорта с учетом характерных особенностей тех или иных типов подвижного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортное средство, технические характеристики, оценка, критерий, показатель, железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт, водный транспорт

Для цитирования: Силюта А. Г., Силюта А. Г., Маяков Д. М. Современные подходы к оценке эффективности создаваемых транспортных средств // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 53–62. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-53-62>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.014

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-53-62



MODERN APPROACHES TO THE EFFICIENCY ASSESSING OF CREATED VEHICLES

Anatoliy G. Silyuta¹✉, Artur G. Silyuta², Denis M. Mayakov³

¹Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

²Research Testing Center of the Railway Troops of the Ministry
of Defense of the Russian Federation (NIITs ZhDV),
Moscow, Russian Federation

³Russian University of Transport (RUT (MIIT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The manufacturers currently develop new locomotives considering operating conditions with further locomotive fixation on the target ground. They also calculate the operational locomotive models with the key indicators for assessing the cost of the life cycle during the engineering stage. Therefore, the basic information for making operational decisions on purchase about selected locomotive items is the evaluation of the traction rolling stock effectiveness. The manufacturers of other vehicle types have similar aims in terms of operating conditions, engineering features, etc.

Materials and methods. The scientists succeed in the usage of the modern evaluating approaches to the vehicles efficiency. The application of the similar criteria that differ in the calculation mechanism and the initial data volume is especially important in evaluating the effectiveness of the multimodal transportation of freight and passenger traffic. The article presented the critical analysis of the main approaches to assessing the effectiveness of the road, water and railway vehicles. Thus, the authors concluded that the manufacturers should consider both the efficiency of the vehicle and the usage intensity.

Results. The authors demonstrate quantitative estimates of the proposed efficiency criterion for certificate features and considering real operational conditions. The paper presents the simulation results comparison with the calculation ones considering certificate features. Thus, operational conditions significantly effect the efficiency criterion.

Discussion and conclusion. The authors highlight that the obtained results are universal for evaluating the effectiveness of the various vehicles in terms of different rolling stock features.

KEYWORDS: vehicle, technical features, assessment, criterion, indicator, rail transport, road transport, water transport

For citation: Silyuta A. G., Silyuta A. G., Mayakov D. M. Modern approaches to the efficiency assessing of created vehicles. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):53–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-53-62>.

Введение. Основные типы транспортных средств и их технические характеристики разрабатываются на основе соответствующих концепций транспортной техники нового поколения с учетом требований действующих нормативных документов, федерального законодательства, достижений научно-технического прогресса и современных мировых тенденций в машиностроении, электротехнике и электронике.

Вновь разрабатываемые транспортные средства предназначены для повышения технико-экономических характеристик грузовых и пассажирских перевозок, а также для замены техники, выработавшей назначенный срок службы. Основными преимуществами новой транспортной техники являются повышение безопасности движения, улучшение качества грузовых и пассажирских перевозок, повышение производительности труда, сокращение стоимости жизненного цикла за счет снижения стоимости разработки и изготовления, улучшение энергетической эффективности силовых установок, увеличение назначенного срока эксплуатации, снижение расходов на техническое обслуживание и текущие ремонты, увеличение среднесуточного и беззаправочного пробега, технической и маршрутной скорости движения, использование альтернативных видов топлива, обеспечение возможности автоматического и беспилотного ведения транспортного средства и др.

При проектировании грузовых, пассажирских и специальных транспортных средств закладываются принципиально отличающиеся энергетические и экологические технические характеристики. Требования к заправочной инфраструктуре при условии использования одного вида топлива остаются едиными.

Количественная оценка соответствия характеристик транспортных средств заданным в нормативно-технической документации требованиям дается с помощью расчета значений специальных критериев. Целью исследования является рассмотрение методических подходов к оценке эффективности транспортных средств автомобильного, морского и железнодорожного транспорта для их обобщения и создания предпосылок к возможности проведения сравнительной оценки эффективности транспортных средств различных видов транспорта. (Под эффективностью транспортного средства будем понимать количественную оценку свойства транспортного средства выполнять заданные функции с требуемым качеством.) Приведенный далее анализ особенностей оценки эффективности создаваемых транспортных средств выстроен по убыванию общего числа существующих транспортных средств.

Автомобильный транспорт. Автомобили являются самым массовым транспортным средством. По данным Росстата, на 2019 г. общее количество грузовых

автомобилей составляет 6540 тыс. единиц, а общее количество пассажирских автомобилей — 48 605 тыс. единиц, в том числе 48 430 тыс. легковых автомобилей. Для сравнения: общее количество речных и морских судов за тот же период составляет 2749 тыс. единиц [1].

Для определения технических характеристик создаваемых автотранспортных средств необходимо в первую очередь установить перечень параметров, которые будут варьироваться. Основными техническими параметрами автотранспортного средства являются его длина, масса, мощность силовой установки, частота вращения коленчатого вала, расход топлива на измеритель, максимальная скорость. В [2] авторами предложено для выбора параметров автотранспортного средства использовать элементы теории подобия и размерностей. Если имеется набор опытных данных уже существующих транспортных средств, то по формулам подобия и размерностей можно в известных пределах сделать заключение о возможных параметрах создаваемого автотранспортного средства.

В качестве исходных данных могут быть приняты технические характеристики существующих автотранспортных средств, построенных аналогично данным [2], сведенным в табл. 1 и 2.

Используя теорию подобия и размерностей, можно показать, в каком направлении велись опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы в области повышения эффективности автотранспортных средств, а также как изменялись их технико-экономические и экологические показатели.

В качестве показателей, определяющих количественную меру изменения характеристик автотранспортных средств, авторами [2] предложены наиболее характерные соотношения, определяющие эффективность автотранспортного средства:

$$u_1 = \frac{P_m \vartheta}{N}; \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{ql}{V}; \quad (2)$$

$$u_3 = \frac{P_r}{P_m}, \quad (3)$$

где u_1 – u_3 — критерий подобия; P_m — масса в снаряженном состоянии, кг; ϑ — максимальная скорость движения, км/ч; N — минимальная мощность двигателя, л. с.; q — контрольный расход топлива, л; l — длина, мм; V — рабочий объем двигателя, л; P_r — грузоподъемность, кг.

Отметим некоторые важные положения. Методы теории подобия и размерностей эффективно применяются для автомобилей, созданных на основе одной и той же конструктивной схемы. Так, например, область параметров легковых машин относительно

Таблица 1
Технические характеристики легковых автомобилей*

Table 1

Technical features of cars*

Наименование характеристики	Volkswagen Golf VIII	Ford Focus	Kia Rio
Длина, мм	4284	4382	4420
Масса, кг	1810	1895	1560
Мощность, л.с.	150	100	100
Расход топлива на 100 км, л	5,8	6,4	5,7
Максимальная скорость, км/ч	216	186	185
Мощность двигателя, л.с.	110	100	100
Рабочий объем двигателя, м ³	0,001 498	0,001 596	0,001 368

*технические характеристики приняты по данным заводов-изготовителей.

*technical features are taken according to the data of manufacturers.

Таблица 2
Технические характеристики грузовых автомобилей*

Table 2

Technical features of trucks*

Наименование характеристики	Mercedes-Benz Actros	КамАЗ-5320
Длина, мм	6000–10 000	7435
Масса, кг	7000–144 000	7080
Мощность, л.с.	320–600	210–240
Расход топлива на 100 км, л	25–130	34
Максимальная скорость, км/ч	162	80–100
Мощность двигателя, л.с.	313–510	210
Рабочий объем двигателя, м ³	0,011 946	0,010 857
Грузоподъемность, кг	40 000	8000

*технические характеристики приняты по данным заводов-изготовителей.

*technical features are taken according to the data of manufacturers.

невелика, стабилизировалась во времени, что указывает на достижение неких оптимальных технических и экономических характеристик автомобилей. Значительное изменение технических характеристик требует применения новых принципов работы и конструирования или применения новых материалов. У грузовых автомобилей и автобусов имеется ярко выраженная тенденция к увеличению грузоподъемности и рабочего объема двигателя и уменьшению расхода топлива.

При проектировании автотранспортного средства по условиям эксплуатации, свойствам и характеристикам перевозимого груза, как правило, выбирается шасси и тип кузова. Далее определяется его грузоподъемность в соответствии с выбранными ограничениями дорожного полотна. В [3] указывается, что критериями оптимальности автотранспортного средства для выбранного типа грузов являются те же критерии, что и для оценки эффективности автотранспортного средства в целом или эффективности транспортного процесса.

На сегодняшний день не существует универсального критерия, однозначно определяющего эффективность автотранспортного средства без учета условий эксплуатации. Как правило, после выбора реальных условий эксплуатации и решаемой задачи определяется частный критерий эффективности, который может быть натуральным, комплексным [4], экономическим [5, 6] и др. В части оценки расхода топлива автотранспортным средством в условиях эксплуатации разработаны и широко используются методические указания [7].

В [8] предложено эффективность автотранспортных средств оценивать системой технико-экономических показателей, отражающих объем перевезенного груза и качество выполненной перевозочной работы. Для определения влияния технико-экономических показателей на критерий эффективности при изменении пробега автотранспортного средства при выбранных условиях его эксплуатации и комплектации используют приемы цепных подстановок [9].

В [4] на основе анализа исследований, выполненных в МАДИ, Иркутской ГСХА, ТюмГНУ, Новосибирском ГАУ и др., сделан важный вывод о различной эффективности автотранспортных средств в разных условиях эксплуатации. Оценка эффективности или степени реализации заданных параметров в реальных условиях эксплуатации не может проводиться только по экономической эффективности, требуется учет и технической эффективности. Также имеет место нарастающая актуальность охраны окружающей среды в части снижения выбросов вредных веществ.

Следует отметить, что для оценки эффективности автотранспортных средств используют значительно отличающиеся по структуре и механизмам расчета критерии. В [4] в качестве количественной меры, отражающей полноту реализации заданных характеристик, предложен уровень обеспеченности автотранспортного средства критериями эффективности:

$$\eta = \sum h_i \alpha_i, \quad (4)$$

где h_i — уровень обеспеченности автотранспортного средства i -го вида критериями эффективности;

α_i — значимость критерия i -го вида в совокупности полного эффекта.

При этом уровень обеспеченности критериями эффективности может использоваться как для интегральной оценки, так и для оценки выбранной группы критериев в зависимости от поставленной задачи [4]:

$$h_{ia}(n_{oa}) = \frac{a'_i}{a_i}; \quad (5)$$

$$h_{ib}(n_{ob}) = \frac{b'_i}{b_i}; \quad (6)$$

$$h_{ic}(n_{oc}) = \frac{c'_i}{c_i}; \quad (7)$$

где a_i, b_i, c_i — выбранные значения критериев экономической, технической и экологической эффективности по данным завода-изготовителя; a'_i, b'_i, c'_i — фактические значения критериев экономической, технической и экологической эффективности по данным завода-изготовителя.

Недостатком такого подхода является необходимость формирования значительного банка данных по эксплуатации автотранспортных средств и ограниченные возможности по создаваемым типам автотранспортных средств.

Из сказанного выше следует важный вывод: в качестве критериев эффективности автотранспортного средства определены не только себестоимость перевозок с учетом погрузочно-разгрузочных работ, рассчитываемая с учетом стоимости конкретных марок подвижного состава, топлива, моторных масел, но и производительность подвижного состава. Использование одного критерия, как правило, применяется при ограниченных сроках доставки груза и ресурсах на его доставку, а также при значительном объеме перевозок. Увеличение количества участников при организации процесса перевозок вызывает необходимость формирования и применения системы критериев качества эксплуатации автотранспортных средств.

Водный транспорт. Водный транспорт занимает второе место после автомобильного по количеству транспортных средств [1]. Новые экономические условия требуют постоянного совершенствования и корректировки порядка разработки и подтверждения прогнозов, программ кораблестроения, важнейших транспортно-технических характеристик кораблей, порядка экспертизы проектов и т. д.

Опорными документами для разработки технического облика современных кораблей и судов являются «Положение о создании кораблей и судов» и «Положение об основных условиях поставки кораблей и судов по государственному оборонному заказу»,

утвержденные на заседании Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации 24 мая 2011 г. под председательством заместителя председателя Правительства Российской Федерации С. Б. Иванова.

Основные технические характеристики кораблей, судов определяются после задания целевого полигона эксплуатации, объема перевозок и необходимости круглогодичного сообщения [10].

В [11] в качестве основных показателей, отражающих эффективность создаваемых судов, рассматриваются провозная способность транспортного средства и коэффициент технической готовности. Второй показатель на стадии проектирования и определения основных технических и экологических характеристик носит прогнозный характер и уточняется по результатам подконтрольной эксплуатации.

Провозная способность водного транспортного средства может быть выражена как эффективная суммарная дальность его годового хода [11]:

$$L = J_c D \alpha, \quad (8)$$

где J_c — средняя суточная дальность, сут; D — количество календарных дней в году, сут; α — коэффициент готовности по дням эксплуатации.

В [12, 13] рассмотрена практическая реализация применения в качестве критерия оценки эффективности водного транспортного средства его эффективной провозной способности при минимальном значении себестоимости перевозки 1 т груза. В табл. 3 сведены полученные экспериментальным путем данные работы водных транспортных средств. Наибольшую эффективность в соответствии с выбранным критерием имеет судно «Брестская крепость».

В [14] автором в качестве важнейших характеристик выбраны скорость, мощность и тяга водного транспортного средства. Следует отметить, что выбор этих параметров при проектировании осуществляется с учетом реальных условий эксплуатации.

В [15] рассмотрен переход от оценки энергетической эффективности водного транспортного средства только лишь по расходу топливно-энергетических ресурсов и ресурсным показателям к интегральной оценке с учетом выбросов вредных веществ двигателями. Для сравнительных расчетов используются следующие данные:

- грузоподъемность;
- расчетная скорость;
- мощность главных двигателей;
- выбросы CO_2 главными и вспомогательными двигателями;
- удельный эффективный расход топлива;
- мощность вспомогательных двигателей;

Таблица 3
Показатели работы водных транспортных средств [12]
Table 3
Performance indicators of water vehicles [12]

Показатель	«Брестская крепость»	«Сибирь»	«Актюбинск»
Потребность в транспортном тоннаже, т (минтай/сельдь)	11 789/2818,5		
Провозная способность судна за рейс, т	4972	4400	4235
Провозная способность судна за эксплуатационный период, т (минтай/сельдь)	24 860/ 19 888	17 600/ 17 600	21 175/ 16 940
Количество рейсов (минтай/сельдь)	5/4	4/4	5/4
Себестоимость перевозки 1 т груза, руб./т	1006,4	1154,0	1210,0

• поправочные коэффициенты, определяемые типом водного транспортного средства и условиями его эксплуатации.

Энергетическая эффективность водного транспортного средства может быть определена по следующей зависимости [16, 17]:

$$EEDI_{\text{усл}} = \frac{Rv}{g_{\Sigma} P_{\Sigma} Q_n^p}, \quad (9)$$

где R — буксировочное усилие, кН; v — скорость хода, м/с; g_{Σ} — удельный расход топлива на все силовые установки, работающие на контрольном режиме, кг/Вт·с; P_{Σ} — общая мощность всех силовых установок, работающих на контрольном режиме, кВт; Q_n^p — низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Необходимо отметить, что знаменатель зависимости (9) содержит в себе важнейшую информацию о составе энергетической установки водного транспортного средства, в том числе о типе применяемого топлива.

В [18] авторами проведен масштабный анализ числовых оценок технических характеристик водных транспортных средств с учетом достижений научно-технического прогресса. В табл. 4 представлена информация по истории развития и учета критериев выбора типа силовой установки для различных периодов разработки водных транспортных средств.

Железнодорожный транспорт. Для оценки эффективности создаваемого автономного тягового подвижного состава используют различные критерии в зависимости от цели решаемой задачи, такие как себестоимость перевозок, стоимость жизненного

цикла подвижного состава, КПД силовой установки подвижного состава и др. [19].

Основными показателями поездной работы магистрального локомотива являются выполненная тонно-километровая работа, суммарный расход дизельного топлива за поездку, время выполнения поездной работы.

Под критерием (индикатором) энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава будем понимать отношение полезного эффекта использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенных в целях получения такого эффекта [20].

Известно несколько методических подходов к определению критерия энергетической эффективности тепловозов.

В [21] предложено определять критерий энергетической эффективности локомотива по следующей зависимости:

$$W = \frac{m_c S}{c_1 B} = \frac{A}{c_1 B}, \quad (10)$$

где m_c — масса состава, т; S — суммарный пробег локомотива, км; c_1 — постоянный коэффициент; B — суммарный расход топлива, т; A — выполненная работа на автосцепке, МДж.

Из зависимости (10) видно, что большую эффективность при выполнении одинаковой работы будет иметь локомотив с более низким суммарным расходом топлива. При этом критерий (10) в предложенном виде не учитывает время выполнения поездной работы. Следовательно, сравниваемые варианты должны иметь не только одинаковую работу, но и одинаковое заданное время хода. Подобное ограничение существенно сужает область проведения сравнительной оценки энергетической эффективности локомотивов.

В [22] предложен способ экспресс-оценки критерия энергетической эффективности по основным техническим данным локомотива, приведенным в технических указаниях. В качестве критерия энергетической эффективности предложено использовать показатель, учитывающий не только расход энергии на выполнение поездной операции, но и время ее выполнения:

$$W = \eta \Pi = \frac{A}{B H_u T} = \frac{A^2}{B H_u T}, \quad (11)$$

где η — КПД тягового средства; Π — производительность тягового средства, МДж/ч; H_u — теплотворная способность топлива (низшая), кДж/кг; T — время выполнения работы, ч.

Таблица 4

История развития и учета критериев выбора типа энергетической установки водного транспортного средства [18]

Table 4

The history of development and of the criteria integration for the power plant type selection of the water vehicle [18]

Критерий	Период			
	Конец XVIII в.	Начало XX в.	2-я пол. XX в.	Настоящее время
Минимизация экипажа машинного отделения	+	+	+	+
Максимизация маневренности*	+	+	+	+
Максимизация автономности**	+	+	+	+
Максимизация мореходности***	+	+	+	+
Минимизация стоимости производства		+	+	+
Максимизация надежности главного двигателя	Не применяется	+	+	+
Минимизация массогабаритных характеристик		+	+	+
Максимизация эксплуатационного КПД	Не применяется	+	+	+
Максимизация гибкости выработки и распределения мощности****	Не применяется		+	+
Минимизация загрязнения воздушной и водной среды	Не применяется			+

* маневренность судна — способность судна быстро изменять направление и скорость движения.

** автономность судна — время, в течение которого корабль способен находиться в море, выполняя назначенные ему задачи, без пополнения запасов питьевой и технической воды, провианта и расходных материалов, не относящихся к движению, а также без смены личного состава.

*** мореходность судна — способность судна противостоять воздействию морского волнения, как правило возникающего из-за ветровых волнений (ветра).

**** гибкость выработки и распределения мощности — способность судна быстро перераспределять вырабатываемую энергию между потребителями в зависимости от тактической обстановки.

Из зависимости (11) видно, что по сравнению с зависимостью (10) учтено время выполнения поездной работы. Однако введение новых конструктивных элементов в состав локомотива может улучшать его технико-экономические характеристики, не изменяя существенно суммарный расход топлива. В таком случае критерии (10) и (11) не применимы для проведения сравнительной оценки локомотивов, а смысл критерия энергетической эффективности может быть расширен.

В [23] для оценки энергетической эффективности предложено использовать показатель, позволяющий дополнительно учитывать изменения в системе технического обслуживания и ремонта, снижение количества неплановых ремонтов и т. д.:

$$W = \frac{A}{CT} = \frac{A}{(c_r + c_{то,тр} + c_{нр})T}, \quad (12)$$

где C — стоимостная мера влияния эксплуатационных факторов, руб.; c_r — стоимость дизельного топлива, потраченного за время T , руб.; $c_{то,тр}$ — стоимость технического обслуживания и ремонта дизеля за время T , руб.; $c_{нр}$ — стоимость неплановых ремонтов, руб.

Таким образом, при оценке эффективности автономных локомотивов требуется учитывать не только расход энергии на перемещение, но и выполненную работу за определенное время, т. е. учитывать оба

фактора — КПД и производительность транспортного средства, тогда наилучшим будет транспортное средство с наибольшим индикатором эффективности. Наиболее полно таким требованиям удовлетворяет критерий (11). Этот критерий пригоден как при оценке транспортного средства при проектировании, так и в процессе эксплуатации. При этом появляется возможность оценить и сравнить индикатор энергетической эффективности для разных типов транспорта. Следует отметить, что приведенный в формуле (11) критерий не отражает влияние факторов, определяющих тягово-динамические свойства, надежность, ресурс, стоимость и некоторых других качеств локомотива напрямую. Учет подобных факторов, например динамических качеств подвижного состава, возможен на следующем этапе при формировании более узкой задачи.

В качестве примера в табл. 5 приведены технические характеристики и некоторые результаты определения индикатора эффективности тепловозов.

Предлагаемый критерий позволяет дать количественную оценку эффективности транспортных средств разных годов выпуска и отличающихся подходами при проектировании.

Например, энергетическая эффективность современного тепловоза 2ТЭ25К^{2М} в 3,41 раза выше, чем у тепловоза ТЭЗ, выпущенного в 1953 г. Если бы мы сравнивали эффективность по КПД тепловоза, то

Таблица 5

Технические характеристики и индикатор эффективности тепловозов на секцию

Table 5

Technical features and efficiency indicator of diesel locomotives per section

Тепловоз	Сила тяги длительная, кН	Скорость длительного режима, км/ч	Расход топлива (номинальный режим), кг/ч	Индикатор эффективности, кДж/ч	Относительная величина
ТЭЗ	186,4	20	340	$9,53 \cdot 10^5$	1,00
ТЭ10	245	24,6	478,7	$1,78 \cdot 10^6$	1,90
2ТЭ116	247,9	24,7	261	$1,91 \cdot 10^6$	2,00
2ТЭ25К ^{2М}	324	28,35	654,5	$3,02 \cdot 10^6$	3,41

повышение эффективности составило бы только 1,1. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении других транспортных средств.

Заключение. Разработка создаваемых типов подвижного состава проводится на основании ряда технико-экономических и эксплуатационно-коммерческих характеристик, определяемых для безусловного выполнения прогнозных показателей грузовых и пассажирских перевозок. Однако в настоящее время для оценки характеристик подвижного состава применяют граничные, т. е. максимальные показатели без учета реальных режимов эксплуатации. Это обстоятельство приводит к универсализации транспортных средств без привязки к конкретному полигону эксплуатации, что, в свою очередь, приводит к нерациональному использованию и перерасходу топливно-энергетических ресурсов. Для определения рациональных характеристик подвижного состава требуется разработка новых подходов к оценке эффективности транспортных средств с учетом интенсивности их эксплуатации.

Анализ критериев оценки эффективности транспортных средств автомобильного, водного и железнодорожного транспорта показал, что количественная оценка эффективности транспортного средства по одному частному критерию, например КПД силовой установки, может приводить к существенным неточностям в итоговой оценке эффективности из-за неучета ряда факторов.

Для корректной оценки эффективности транспортных средств следует применять систему критериев, учитывающую не только КПД транспортного средства, но и интенсивность его использования. Таким комплексным критерием для железнодорожного транспорта может быть произведение среднеексплуатационного КПД и производительности транспортных средств.

В настоящее время проводится системная работа по созданию математического аппарата для корректной оценки показателей поездной работы тепловозов, что позволит с необходимой точностью и достоверностью вычислять критерий эффективности транспортного средства, целевое значение которого планируется

внести в электронный формуляр каждого тепловоза на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Также значительную практическую ценность имеет возможность количественной оценки эффективности подвижного состава одного назначения различных годов выпуска.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 11.02.2021).
2. Алабужев П. М., Алимов О. Д., Шеховцев Б. А. Применение теории подобия и размерностей к выбору параметров автомашин // Известия Томского политехнического института. 1965. № 129. С. 71–84.
3. Мочалин С. М., Заруднев Д. И. Об оценке эффективности автотранспортных средств // Мир транспорта. 2009. № 2. С. 70–73.
4. Долгушин А. А., Воронин Д. М. Методика интегральной оценки эффективности эксплуатации автомобилей // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (24). С. 183–188.
5. Менухова Т. А., Солодкий А. И. Экономическая эффективность эксплуатации автомобиля // Записки Горного института. 2016. № 219. С. 444–448.
6. Кондратьев А. Е. Определение наиболее оптимальных сегментов использования экологически чистых автотранспортных средств в российских городах // Теория и практика общественного развития. 2012. № 6. С. 203–206.
7. Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте [Электронный ресурс]: введены в действие распоряжением Минтранса России от 14 марта 2008 г. № АМ-23-р (в ред. на 30 сентября 2021 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902092963> (дата обращения: 23.09.2021).
8. Пеньшин Н. В. Оценка эффективности функционирования автомобильного транспорта // Вопросы современной науки и практики. 2008. № 1 (11). С. 89–98.
9. Абдукаримов И. Т. Факторный анализ и методика цепных подстановок // Актуальные вопросы экономики и управления. 2015. № 2. С. 8–12.
10. Штрек А. А. Современные тенденции и вызовы при проектировании арктических транспортных судов // Российская Арктика. 2019. № 5. С. 30–35.
11. Гусейнов М. Р. Обоснование выбора критериев эффективности транспортных судов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2010. № 18. С. 89–95.

12. Бурханов С.Б., Кучеренко Л.В. Разработка оптимального варианта транспортного обеспечения добывающих судов охотоморской экспедиции // Научные труды Дальрыбвтуза. 2015. № 34. С. 51–57.
 13. Бурханов С.Б., Кучеренко Л.В., Баштовая Е.Д. Оптимизация работы судов танкерного флота при обслуживании рыбопромысловых экспедиций // Научные труды Дальрыбвтуза. 2013. № 30. С. 173–182.
 14. Май Ван Куан. Оптимизация характеристик спасательных судов и пополнения спасательного флота Вьетнама // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технологии. 2013. № 2. С. 34–45.
 15. Иванченко А.А., Петров А.П., Жевлюк Г.Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 3(31). С. 103–112.
 16. Павловский В.А., Реуцкий А.С. Обоснование характеристик грузовой системы бункеровщиков сжиженного природного газа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. № 2. С. 191–199.
 17. Шурпак В.К., Гришкин В.В. О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2013. № 36. С. 191–212.
 18. Гильмияров Е.Б., Цветков В.В. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2006. № 3. С. 502–513.
 19. Инновационные методы оценки эффективности работы тепловозов / Е.Е. Коссов [и др.] // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-техн. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта: в 2 ч. / под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричани. М.: РАС, 2019. Ч. 2. С. 127–134.
 20. ГОСТ Р 56828.29–2017. Наилучшие доступные технологии. Энергосбережение. Порядок определения показателей (индикаторов) энергоэффективности: нац. стандарт Российской Федерации: дата введения 2017–12–01. М.: Стандартинформ, 2017. 19 с.
 21. Методика расчета индикатора энергетической эффективности (ИЭЭФ) тепловоза: утв. ОАО «РЖД» 26 декабря 2014 г. № 516 / ОАО «РЖД». М., 2014. 42 с.
 22. Коссова Л.Е., Коссов Е.Е., Фурман В.В. Индикатор энергетической эффективности транспортного средства // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 180-летию железных дорог России (Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). СПб.: ПГУПС, 2017. С. 365–368.
 23. Бабел М. Теоретические основы и методология выбора объемов и технологий модернизации тепловозов по критерию стоимости жизненного цикла: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. М., 2014. 266 с.
- ## REFERENCES
1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service]: ofitsial'nyy sayt [official site]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (access date: 11.02.2021). (In Russ.).
 2. Alabuzhev P.M., Alimov O.D., Shekhovtsev B.A. Primenenie teorii podobiya i razmernostey k vyboru parametrov avtomashin [Application of the theory of similarity and dimensions to the choice of car parameters]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*. 1965;(129):71–84. (In Russ.).
 3. Mochalin S.M., Zarudnev D.I. Ob otsenke effektivnosti avtotransportnykh sredstv [On the assessment of the efficiency of vehicles]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2009;(2):70–73. (In Russ.).
 4. Dolgushin A.A., Voronin D.M. Metodika integral'noy otsenki effektivnosti ekspluatatsii avtomobiley [Methods of integral assessment of the efficiency of car operation]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Omsk State Agrarian University*. 2016;4(24):183–188. (In Russ.).
 5. Menukhova T.A., Solodkiy A.I. Ekonomicheskaya effektivnost' ekspluatatsii avtomobilya [Economic efficiency of car operation]. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;(219):444–448. (In Russ.).
 6. Kondrat'ev A.E. Opredelenie naibolee optimal'nykh segmentov ispol'zovaniya ekologicheskikh chistykh avtotransportnykh sredstv v Rossiyskikh gorodakh [Determination of the most optimal segments for the use of environmentally friendly vehicles in Russian cities]. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya = Theory and practice of social development*. 2012;(6):203–206. (In Russ.).
 7. Normy raskhoda topliv i smazochnykh materialov na avtomobil'nom transporte [Norms of consumption of fuels and lubricants in road transport]: vvedeny v deystvie rasporyazheniem Mintransa Rossii ot 14 marta 2008 g. № AM-23-r [put into effect by Order of the Ministry of Transport of Russia dated March 14, 2008 No. AM-23-r (as amended on September 30, 2021)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902092963> (access date: 23.09.2021). (In Russ.).
 8. Pen'shin N.V. Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya avtomobil'nogo transporta [Evaluation of the effectiveness of the functioning of road transport]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki = Issues of modern science and practice*. 2008;1(11):89–98. (In Russ.).
 9. Abdulkarimov I.T. Faktornyy analiz i metodika tsepykh podstanovok [Factor analysis and methods of chain substitutions]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya = Actual problems of economics and management*. 2015;(2):8–12. (In Russ.).
 10. Shtrek A.A. Sovremennye tendentsii i vyzovy pri proektirovani arkticheskikh transportnykh sudov [Modern trends and challenges in the design of Arctic transport ships]. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2019;(5):30–35. (In Russ.).
 11. Guseynov M.R. Obosnovanie vybora kriteriev effektivnosti transportnykh sudov [Substantiation of the choice of criteria for the effectiveness of transport courts]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2010;(18):89–95. (In Russ.).
 12. Burkhanov S.B., Kucherenko L.V. Razrabotka optimal'nogo varianta transportnogo obespecheniya dobyvayushchikh sudov okhotomorskoy ekspeditsii [Development of an optimal variant of transport support for the mining vessels of the Sea of Okhotsk expedition]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza = Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*. 2015;(34):51–57. (In Russ.).
 13. Burkhanov S.B., Kucherenko L.V., Bashtovaya E.D. Optimizatsiya raboty sudov tankernogo flota pri obsluzhivani rybpromyslovyykh ekspeditsiy [Optimization of the operation of tanker fleet vessels in servicing fishing expeditions]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza = Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*. 2013;(30):173–182. (In Russ.).
 14. May Van Kuan. Optimizatsiya kharakteristik spasatel'nykh sudov i popolneniya spasatel'nogo flota V'etnama [Optimization of the features of rescue ships and replenishment of the rescue fleet of Vietnam]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologii = Vestnik of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2013;(2):34–45. (In Russ.).
 15. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhevlyuk G.E. Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov [Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova = Bulletin of the State University of Marine and River Fleet. Admiral S. O. Makarov*. 2015;3(31):103–112. (In Russ.).
 16. Pavlovskiy V.A., Reutskiy A.S. Obosnovanie kharakteristik gruzovoy sistemy bunkerovshchikov szhizhennogo prirodnogo gaza [Substantiation of the features of the cargo system of bunkerers of liquefied natural gas]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Proceedings of the Krylov State Research Center*. 2018;(2):191–199. (In Russ.).

17. Shurpyak V. K., Grishkin V. V. O konstruktivnom koeffitsiente energeticheskoy effektivnosti sudov ledovogo plavaniya [On the constructive coefficient of energy efficiency of ice navigation vessels]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva = Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2013;(36):191–212. (In Russ.).

18. Gil'miyarov E. B., Tsvetkov V. V. Mnogokriterial'nyy podkhod k vyboru sudovoy energeticheskoy ustanovki [A multi-criteria approach to the choice of a ship power plant]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU. Scientific journal of Murmansk State Technical University*. 2006;(3):502–513. (In Russ.).

19. Kossov E. E., Silyuta A. G., Kossova L. E., et al. Innovatsionnye metody otsenki effektivnosti raboty teplovozov [Innovative methods for evaluating the efficiency of diesel locomotives]. Aktual'nye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta: v 2 ch. / pod red. A. B. Kosareva, G. V. Gogrichiani [Actual issues of development of railway transport: materials of the All-Russian scientific and technical conference for the 75th anniversary of the postgraduate study of the Railway Research Institute: in 2 parts / under edition of A. B. Kosarev, G. V. Gogrichiani]. Moscow: RAS Publ.; 2019. Part 2. P. 127–134. (In Russ.).

20. GOST R 56828.29–2017. Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Energoberezhenie. Poryadok opredeleniya pokazateley (indikatorov) energoeffektivnosti: nats. standart Rossiyskoy Federatsii [The best available technologies. Energy saving. The procedure for determining indicators (indicators) of energy efficiency: nat. standard of the Russian Federation]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. 19 p. (In Russ.).

21. Metodika rascheta indikatora energeticheskoy effektivnosti (IEEF) teplovoza: utv. OAO "RZHD" 26 dekabrya 2014 g. № 516 [Methodology for calculating the energy efficiency indicator (IEEF) of a diesel locomotive: approved by JSC Russian Railways December 26, 2014 No. 516]. Moscow: JSC Russian Railways Publ.; 2014. 42 p. (In Russ.).

22. Kossova L. E., Kossov E. E., Furman V. V. Indikator energeticheskoy effektivnosti transportnogo sredstva [Indicator of vehicle energy efficiency]. Lokomotivy. Transportno-tekhnologicheskie komplekсы. XXI vek: sb. materialov V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 180-letiyu zheleznikh dorog Rossii (Sankt-Peterburg, 14–16 noyabrya 2017 g.) [Locomotives. Transport and technological complexes. XXI century: coll. of materials of the V International scientific and technical conference dedicated to the 180th anniversary of the railways of Russia (St. Petersburg, November 14–16, 2017)]. St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2017. P. 365–368.

23. Babel M. Teoreticheskie osnovy i metodologiya vybora ob'emov i tekhnologiy modernizatsii teplovozov po kriteriyu stoimosti zhiznennogo tsikla: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theoretical foundations and methodology for the choice of volumes and technologies for the modernization of diesel locomotives according to the criterion of life cycle cost: Diss ... Dr. Tech. Sci.]. Moscow; 2014. 266 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Геннадьевич СИЛЮТА, канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Тепловозы», научный центр «Тяга поездов», АО «ВНИИЖТ», Author ID: 933004, <https://orcid.org/0000-0001-9511-1704>

Артур Геннадьевич СИЛЮТА, младший научный сотрудник, ФГБУ «НИИЦ ЖДВ», <https://orcid.org/0000-0002-6622-5902>

Денис Михайлович МАЯКОВ, аспирант, кафедра «Электропоезда и локомотивы», ФГАОУ ВО «РГТ» (МИИТ), Author ID: 1096036, <https://orcid.org/0000-0003-1597-3246>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy G. SILYUTA, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Laboratory "Diesel Locomotives", Research Center "Traction of Trains", JSC "VNIIZhT", Author ID: 933004, <https://orcid.org/0000-0001-9511-1704>

Artur G. SILYUTA, Junior Researcher, FGBU "NIITs ZhDV", <https://orcid.org/0000-0002-6622-5902>

Denis M. MAYAKOV, Post-Graduate, Department "Electric Trains and Locomotives", FGAOU VO "RUT" (MIIT), Author ID: 1096036, <https://orcid.org/0000-0003-1597-3246>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Геннадьевич СИЛЮТА. Формирование цели исследования, сбор и структурирование материалов по направлению «Железнодорожный транспорт», обобщение материалов по направлениям исследования, формулировка выводов (50 %).

Артур Геннадьевич СИЛЮТА. Сбор и структурирование материалов по направлению «Автомобильный транспорт», редактирование и переработка статьи (30 %).

Денис Михайлович МАЯКОВ. Сбор и структурирование материалов по направлению «Водный транспорт» (20 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoliy G. SILYUTA. Formation of the research goal, collection and structuring of materials in the section of "Railway transport", generalization of materials in the areas of research, formulation of conclusions (50 %).

Artur G. SILYUTA. Collection and structuring of materials in the section of "Motor transport", editing and revision of the article (30 %).

Denis M. MAYAKOV. Collection and structuring of materials in the section of "Water transport" (20 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 29.09.2021, первая рецензия получена 22.11.2021, вторая рецензия получена 10.01.2022, принята к публикации 21.01.2022.

The article was submitted 29.09.2021, first review received 22.11.2021, second review received 10.01.2022, accepted for publication 21.01.2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.222.6

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70



**ВЫБОР СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ
В УСЛОВИЯХ ВОЗРАСТАЮЩИХ ПОТРЕБНОСТЕЙ ОСВОЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ
ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОК**

Н. В. Корниенко, М. И. Мехедов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены недостатки существующей методики расчета наличной пропускной способности однопутной железнодорожной линии аналитическим методом посредством ее определения по лимитирующему перегону. Применяемая сегодня методика расчета не учитывает в полной мере все факторы, влияющие на организацию перевозочного процесса. Данный метод предполагает, что все поезда или пары поездов занимают пропускную способность участка равномерно, что не соответствует реальной ситуации. Железнодорожные участки должны иметь некоторый резерв, способный обеспечить перевозки при возможных скачках фактически предъявляемых объемов перевозок.

Материалы и методы. Предложен новый подход к определению пропускной способности в целом по участку посредством имитационного моделирования через построение вариантов графиков движения поездов и с учетом различных факторов, влияющих на пропускную способность. Выполнен сравнительный анализ показателей перевозочного процесса при использовании двух вариантов системы интервального регулирования движения — с автоматической и полуавтоматической блокировкой в условиях неравномерности движения.

Результаты. Проведенное имитационное моделирование показало, что применение полуавтоматической блокировки в качестве системы интервального регулирования движения поездов не сможет обеспечить пропуск плановых объемов поездопотока через однопутный участок проектируемой железнодорожной линии в сложных климатических условиях.

Обсуждение и заключение. Более целесообразно применение автоматической блокировки, поскольку этот вариант системы интервального регулирования движения позволит обеспечить не только требуемую пропускную способность, но и возможность диагностики состояния целостности рельсовой нити, что в условиях низких температур является немаловажным вопросом в области обеспечения безопасности движения поездов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная линия, пропускная способность, график движения поездов, участковая скорость, полигонная технология, имитационное моделирование, система интервального регулирования, блокировка

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

Для цитирования: Корниенко Н. В., Мехедов М. И. Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 63–70. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70>.



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.222.6

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70



CHOICE OF THE INTERVAL TRAFFIC CONTROL SYSTEM IN TERMS OF INCREASING DEMANDS FOR THE COVERAGE OF FORECAST TRAFFIC VOLUMES

Natal'ya V. Kornienko, Mikhail I. Mekhedov

Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors view methodology disadvantages for the calculating the existent traffic capacity of the single track analytically by defining the limiting space interval. The current calculation methodology does not fully consider the factors influencing the traffic organization. Thus, this method implies that all trains or pairs of trains evenly distribute the traffic capacity does not corresponding to the real situation. Railway sections should have some reserve capacity that provides carriage in condition of actual traffic volume.

Materials and methods. The authors proposed a new approach for determining the traffic capacity by the situation modeling through the alternate graph of train traffic and in accordance with various factors effecting the traffic capacity. Moreover, the authors carried out a comparative analysis of the transportation process indicators. They used two variants of the interval control system — automatic and semi-automatic blocking — in irregular traffic conditions.

Results. The performed simulation modeling demonstrates that the use of semi-automatic blocking train interval control does not secure the planned train traffic capacity through the single-track designed line in difficult climatic conditions.

Discussion and conclusion. The automatic blocking is considered more appropriate for the train interval control system. The mentioned blocking will provide not only the required capacity, but also the possibility of diagnosing the state of the trackway integrity. It is an important issue providing train traffic safety at low temperatures.

KEYWORDS: railway line, traffic capacity, graph of the train traffic, service speed, proving ground technology, simulation modeling, interval control system, blocking

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

For citation: Kornienko N.V., Mekhedov M.I. Choice of the interval traffic control system in terms of increasing demands for the coverage of forecast traffic volumes. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):63–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-63-70>.

Введение. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года определены приоритетные направления для освоения прогнозируемых объемов перевозок, одним из которых является увеличение объема грузов, а следовательно, и гарантированная пропускная способность.

Поэтому для стабильного продвижения планового поездопотока необходимо определить систему интервального регулирования движения поездов с оптимальными технико-экономическими показателями для последующей стабильной эксплуатации проектируемой железнодорожной линии.

В рамках выполненной работы определена технология продвижения поездопотока через проектируемый участок от мест зарождения грузопотока до мест его погашения посредством имитационного моделирования и построения вариантных графиков движения поездов в автоматизированной системе (АС) ЭЛБРУС-РПС при различных вариантах железнодорожной автоматики и телемеханики, а именно использование в качестве систем интервального регулирования автоматической блокировки (АБ) и полуавтоматической блокировки (ПАБ) [1].

Расчет пропускной способности проектируемого участка аналитическим методом. Техническая возможность железных дорог по обеспечению перевозок пассажиров и грузов определяется наличной пропускной способностью основных устройств и сооружений. Наличной пропускной способностью железнодорожного участка называется максимальное число грузовых поездов (пар поездов) установленного веса и длины, которое может быть пропущено по этому участку за сутки в зависимости от его технической оснащенности и принятого способа организации движения поездов [2]. Исходными данными для расчета пропускной способности участка являются: количество главных путей на перегоне, средства сигнализации и связи по движению поездов, путевое развитие промежуточных раздельных пунктов, времена хода поездов по перегонам, станционные и межпоездные интервалы, принятый тип графика движения, особые условия организации движения поездов (подталкивание или двойная тяга поездов, обслуживание примыканий на перегоне и т. д.).

В целях повышения пропускной и провозной способности участка проектируемой однопутной железнодорожной линии между станциями предполагается строительство раздельных пунктов (разъездов). Путевое развитие разъездов предназначено для обеспечения скрещения и обгона поездов. В качестве технического средства организации движения поездов в проектных решениях рассматривался вариант применения ПАБ с электрической сигнализацией стрелок и

сигналов. Расчет наличной пропускной способности при заданной системе интервального регулирования движения поездов и на заданном участке производится согласно широко используемому существующему подходу определения наличной пропускной способности железнодорожной линии, который предполагает ее расчет по лимитирующему участку. Наличная пропускная способность перегона определяется делением суточного бюджета времени на период графика движения поездов [2].

Расчет пропускной способности выполняется по каждому перегону участка, а определение результирующей пропускной способности участка производится по ограничивающему перегону. Ограничивающим называется перегон, имеющий наименьшую пропускную способность из всех перегонов участка.

Наличная пропускная способность однопутных участков, не оборудованных АБ, определяется в парах поездов по формуле

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \alpha_n}{T_{\text{пер}}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \alpha_n}{\sum T_x + \tau_a + \tau_6},$$

где $T_{\text{пер}}$ — период графика движения поездов, мин; $t_{\text{тех}}$ — продолжительность суточного бюджета времени ($t_{\text{тех}} = 90$ мин), выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ, мин; α_n — коэффициент ($\alpha_n = 0,92$), учитывающий надежность работы технических средств (инфраструктуры и подвижного состава); $\sum T_x$ — суммарное время хода пары поездов по ограничивающему перегону с учетом их разгонов и замедлений, предусмотренных схемой пропуска, мин; τ_a, τ_6 — станционные интервалы скрещения и не одновременного прибытия, мин.

Расчетный фрагмент графика движения при ПАБ приведен на рис. 1.

Расчет наличной пропускной способности выполнен аналитическим методом по представленной формуле в общем виде для однопутных участков, не оборудованных АБ, с определением по результатам расчета ограничивающих перегонов. Варианты схем прокладки поездов на максимальных перегонах в статье детально не рассматриваются, поскольку на проектируемой железнодорожной линии применение ПАБ нецелесообразно, учитывая сложные погодные условия, планируемые размеры движения и задачи, поставленные для обеспечения стабильного продвижения поездопотоков.

Выполнены расчеты наличной пропускной способности в случае применения на проектируемой железнодорожной линии ПАБ, согласно которым определены перегоны, имеющие предельное значение пропускной способности и являющиеся лимитирующими.

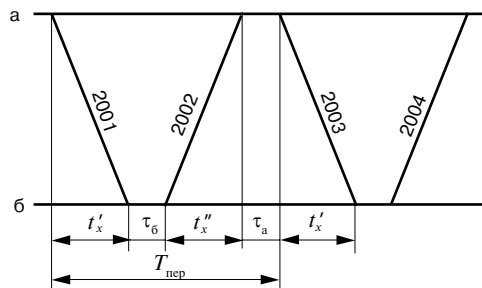


Рис. 1. Фрагмент графика движения поездов при ПАБ [2]:

а, б — условные обозначения железнодорожных станций, ограничивающих перегон; t'_x, t''_x — время хода в нечетном и четном направлениях соответственно; τ_a, τ_b — стационарные интервалы скрещения и неодновременного прибытия; $T_{\text{пер}}$ — период графика движения поездов

Fig. 1. Fragment of the train traffic graph for semi-automatic blocking [2]:

a, b — symbols of railway stations limiting the stage; t'_x, t''_x — travel time in odd and even directions, respectively; τ_a, τ_b — station intervals of crossing and non-simultaneous arrival; $T_{\text{пер}}$ — period of the train traffic graph

При существующей методике расчета наличная пропускная способность будет достаточной для обеспечения пропуска заданных объемов поездопотока даже при использовании в качестве системы интервального регулирования ПАБ.

Расчет пропускной способности проектируемого участка посредством имитационного моделирования. Однако приведенная выше методика расчета наличной пропускной способности имеет свои недостатки, поскольку фактическая возможность железнодорожной линии по пропуску заданных объемов перевозок может оказаться либо выше максимально расчетной, либо ниже ее, так как порядок использования постоянных устройств меняется в зависимости от сложившихся эксплуатационных условий [3].

Расчеты пропускной способности в основном используются при проектировании новых железнодорожных линий (значительно меньше при планировании и в управленческой деятельности), что приводит к возникновению несоответствия потребности и возможности перевозочного процесса, а следовательно, к затруднениям в эксплуатационной работе.

Использование аналитического метода расчета не распространяется на максимальные размеры поездов, там, где наиболее важно определять пропускную способность участков [4].

Железнодорожные участки должны иметь некоторый резерв, способный обеспечить перевозки при возможных скачках фактически предъявляемых объемов перевозок. Если размеры перевозок на каком-либо направлении будут превышать перево-

зочную мощность линии даже на один день, ликвидация последствий, возникающих при этом, займет очень длительное время. Таким образом, фактор неравномерности в первую очередь должен учитываться в эксплуатационной работе при определении максимальных размеров движения поездов для разработки графика [5].

Степень неравномерности грузовых перевозок является одним из существенных факторов при определении потребной пропускной способности участков, при этом пропускная способность направлений определяется по ограничивающему участку. Чем выше неравномерность грузовых перевозок, тем большими оказываются в отдельные периоды времени сгущения вагонопотоков, поездопотоков и грузопотоков, и, соответственно, для их освоения возрастает потребная пропускная и перерабатывающая способность различных объектов инфраструктуры [6].

Как один из способов достоверного определения наличной пропускной способности [7] предлагается построение вариантных графиков движения поездов. Такой способ наиболее эффективен на однопутных линиях с резкими колебаниями в размерах движения с учетом предоставления «окна», необходимого для производства работ.

Целью исследования является приведение методики расчета пропускной способности к техническим характеристикам проектируемого участка, которые постоянны и независимы от способа организации движения поездов.

Для определения пропускной способности применено имитационное моделирование, позволяющее учитывать все особенности реального продвижения поездопотока не по лимитирующему перегону, а по рассматриваемому железнодорожному участку в целом с учетом влияния на него колебаний размеров поездопотока, когда «... пропускной способностью участка является максимальная эффективность, при которой поток поездов может пройти по всему участку в течение определенного отрезка времени, смещенного на выходе участка на величину времени хода в зависимости от технической оснащенности» [4].

Имитационное моделирование продвижения поездопотока через участок проектируемой железнодорожной линии и построение вариантных графиков проведены в автоматизированной системе АС ЭЛБРУС-РПС, разработанной в АО «ВНИИЖТ». Система предназначена для определения максимального количества грузовых поездов, которые могут быть пропущены по участку железной дороги с соблюдением допустимых межпоездных интервалов движения, с учетом принятой организации пропуска пассажирских, пригородных и ускоренных поездов, ограничений скорости движения, «окон» для ремон-

та и модернизации инфраструктуры с использованием методов имитационного моделирования.

Моделирование необходимо для решения сложных проблем управления при невозможности проведения экспериментов на практике [8]. Главная идея имитационного моделирования — это имитация реальной системы, чтобы исследовать и понять ее свойства, поведение и характеристики [9, 10].

Работы по комплексному исследованию пропускной способности рассматриваемого участка включают в себя несколько основных этапов [11]:

1. Подготовка исходных данных.
2. Выполнение вариантных расчетов графиков движения поездов для различных исходных данных.
3. Расчет параметров вариантных графиков и анализ полученных результатов.

После подготовки исходных данных выполняют последовательные расчеты с помощью автоматизированной программы, при которых увеличивается число грузовых поездов в обращении до достижения предельного значения $N_{\max}$.

$N_{\max}$ представляет собой максимально возможное количество грузовых поездов, которому соответствует физически реализуемый график, построенный с помощью АС ЭЛБРУС-РПС.

При моделировании для каждого рассчитанного и построенного графика движения определяются:

- маршрутная, участковая и техническая скорость;
- число остановок грузовых поездов для пропуска пассажирских и пригородных поездов;
- продолжительность стоянок грузовых поездов.

С учетом этого появляется возможность выбирать $N_{\max}$ таким образом, чтобы отступить от суммарного максимального числа остановок и их суммарной продолжительности.

АС ЭЛБРУС-РПС позволяет достаточно оперативно строить вариантные графики движения с использованием различных исходных данных, в том числе для разного числа грузовых поездов, и определять участковые скорости движения для каждого рассчитанного варианта. Таким образом, могут быть получены расчетные зависимости участковой скорости от числа грузовых поездов и других определяющих движение поездопотока факторов для участков или направлений железной дороги.

Применение автоматизированного метода расчета пропускной способности путем имитационного моделирования позволяет быстро определить рациональные размеры движения грузовых поездов, а также резерв «ниток», который возможно заложить в график движения поездов.

Для исключения влияния различных вариантов подхода грузовых поездов при начале моделирования используется метод статистических испытаний, при

котором поезда подходят к границам участка случайным образом, и программа обеспечивает при заданном числе грузовых поездов в обращении несколько вариантов графиков движения при каждом варианте подхода. Очевидно, что есть более и менее благоприятные варианты графиков. Это выражается в том, что для каждого фиксированного числа грузовых поездов в обращении значимые параметры (значение участковой скорости, число остановок поездов, их продолжительность) имеют определенный разброс, характеризующий влияние фактора подвода поездов к участку проследования.

В процессе имитационного моделирования определена достаточность мероприятий по удлинению и строительству приемоотправочных путей на технических станциях, а также возможность остановки поездов для обгона и скрещения на промежуточных станциях и разъездах.

Выбор системы интервального регулирования движения поездов. Для проведения имитационного моделирования графика движения поездов в АС ЭЛБРУС-РПС был выполнен энергооптимальный тяговый расчет траектории движения поезда для конкретной поездки при обеспечении минимума затрат механической энергии локомотива на тягу и с учетом плана и профиля пути, массы состава и характеристик локомотива в соответствии с [12, 13] для расчетного тепловоза 3ТЭ25КМ.

Графики проектировались в следующем порядке:

- освоение проектных размеров движения и обеспечение запаса пропускной способности, который выражается в дополнительных нитках графика;
- выполнение ограничений по пропускной способности станций и разъездов;
- обеспечение размеров движения снегоуборочной техники не менее двух пар в сутки.

Организацию движения поездов регламентирует нормативный график движения, а фактическое использование пропускной способности определяется посредством исполненного графика. Поскольку железнодорожный участок еще не введен в эксплуатацию, вопросы построения исполненного графика движения поездов и его выполнение рассматривать преждевременно. Авторами предложены вариантные графики движения поездов, предусматривающие организацию движения поездов с учетом пропуска пассажирских поездов, количества и полезной длины станционных путей, неравномерности грузовых перевозок, организации работы в зимних и летних условиях в период проведения технологических «окон», сложных погодных условий в зимний период во время работы снегоуборочной техники, определены значения участковой скорости и пропускной способности на перегонах проектируемой железнодорожной линии.

Таблица 1

Показатели перевозочного процесса в условиях суточной неравномерности движения
(поступление плановых объемов в размере 30 % в период с 00:00 до 11:00, 70 % в период с 11:00 до 23:00)

Table 1

Transportation process indicators considering daily uneven traffic
(receipt of planned volumes in the amount of 30 % from 00:00 to 11:00, 70 % from 11:00 to 23:00)

Система интервального регулирования движения	Плановые размеры движения, пар поездов/сут	В интервале с 00:00 до 11:00 пар поездов	В интервале с 11:00 до 23:00 пар поездов	Исполненный размер движения +/- к плану, пар поездов/сут	Исполненный размер движения к плану, %	$v_{уч}$, км/ч	$v_{тех}$, км/ч	$\beta_{уч}$
АБ	19	7	13	0	0	43,1	60,2	0,72
ПАБ		6	11	-3	-15	43,1	57,2	0,69

Примечания: $v_{уч}$ — участковая скорость; $v_{тех}$ — техническая скорость; $\beta_{уч}$ — коэффициент участковой скорости.

Notes: $v_{уч}$ — service speed; $v_{тех}$ — technical speed; $\beta_{уч}$ — service speed coefficient.

Таблица 2

Показатели перевозочного процесса в условиях проведения «окон»

Table 2

Transportation process indicators considering the breaks in train shedule

Система интервального регулирования движения	Плановые размеры движения, пар поездов/сут	Пропускная способность участка при продолжительности «окна» 8 ч, пар поездов/сут	Исполненный размер движения +/- к плану, пар поездов/сут	Исполненный размер движения к плану, %	$v_{уч}$, км/ч	$v_{тех}$, км/ч	$\beta_{уч}$
АБ	19	20	+1	+5 %	41,5	58,1	0,71
ПАБ		13	-6	-32 %	37,9	56,4	0,67

При сравнительном анализе вариантных графиков движения поездов для вариантов системы интервального регулирования движения поездов на проектируемом участке при условии суточной неравномерности грузовых перевозок очевидно, что при применении ПАБ график уплотнить невозможно. Это

связано с особенностью технологии работы с ПАБ, при использовании которой поезда на перегон могут отправляться только равномерно. Обеспечение пропуска плановых суточных объемов перевозок может быть достигнуто только за счет резерва ниток графика движения поездов, который при ПАБ отсутствует.

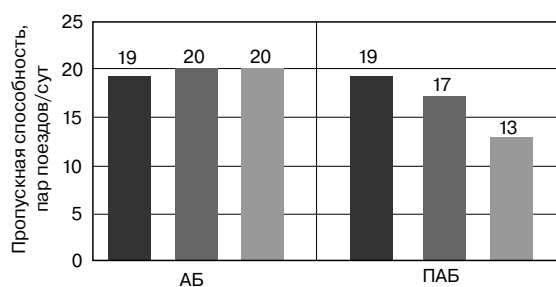


Рис. 2. Прогнозный сравнительный анализ пропускной способности проектируемого участка при использовании АБ и ПАБ при суточной неравномерности перевозок и в период проведения технологических «окон»:
■ — план, пар поездов/сут; ■ — факт, пар поездов/сут
Fig. 2. Predictive comparative analysis of the capacity of the projected section using automatic and semi-automatic blocking with daily uneven traffic and during technological breaks in train shedule:
АБ — automatic blocking; ПАБ — semi-automatic blocking;
■ — plan, pairs of trains per day; ■ — daily irregularity, pairs of trains per day; ■ — breaks in train shedule, pairs of trains per day

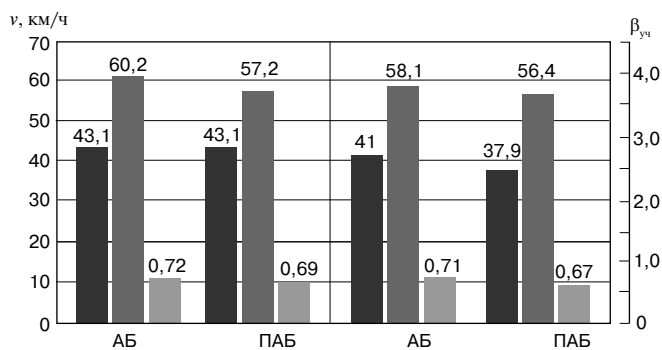


Рис. 3. Основные качественные показатели перевозочного процесса на проектируемом участке при использовании АБ и ПАБ в условиях неравномерности перевозок (слева) и проведения технологических «окон» (справа):
■ — $v_{уч}$, км/ч; ■ — $v_{тех}$, км/ч; ■ — $\beta_{уч}$
Fig. 3. Main quality indicators of the transportation process on the projected section using automatic and semi-automatic blocking concerning of uneven transportation (left) and carrying out technological breaks in train shedule (right):
■ — $v_{уч}$, км/ч; ■ — $v_{тех}$, км/ч; ■ — $\beta_{уч}$

АБ позволяет обеспечить выполнение графика движения поездов при суточной неравномерности движения $\pm 30\%$, при отклонении в указанном диапазоне дополнительного резерва ниток графика не требуется, т. е. при АБ возникает возможность выполнения графика движения поездов при суточном колебании величины объемов перевозок.

Сравнительный анализ показателей перевозочного процесса при использовании двух вариантов системы интервального регулирования движения в условиях его неравномерности приведен в табл. 1, рис. 2, 3, при проведении технологических «окон» — в табл. 2, рис. 2, 3.

По результатам проведенного имитационного моделирования следует, что ПАБ в качестве системы интервального регулирования движения поездов не сможет обеспечить пропуск плановых объемов через участок проектируемой железнодорожной линии, и в данном случае целесообразней применить АБ, которая позволит обеспечить не только требуемую пропускную способность, но и возможность диагностики состояния целостности рельсовой нити, что в условиях низких температур является немаловажным вопросом в области обеспечения безопасности движения поездов.

Обсуждение и заключение. Существующая методика расчета наличной пропускной способности однопутной железнодорожной линии аналитическим методом посредством ее определения по ограничивающему перегону (с наименьшей пропускной способностью) не учитывает в полной мере все факторы, влияющие на организацию перевозочного процесса. Аналитический метод предполагает, что все поезда или пары поездов занимают пропускную способность участка равномерно, что не соответствует реальной ситуации. Возникает необходимость существенно менять подход к определению наличной пропускной способности железнодорожного участка не по лимитирующему перегону, а по участку в целом, учитывая такие факторы, как неравномерность движения, сложные погодные условия, сезонность перевозок и т. д.

Предложенная методика определения пропускной способности посредством имитационного моделирования через построение вариантных графиков движения поездов в АС ЭЛЬБРУС-РПС позволяет наиболее точно выявить внутренние закономерности для поиска проблемных зон в пропускной способности железнодорожного участка и достоверно определить его транспортный потенциал в случае изменения технологии работы и резерв «ниток», который возможно заложить в график движения поездов.

Результаты проведенных исследований апробированы на проектируемом железнодорожном полигоне «Северный широтный ход».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 13–19.
2. Инструкция по расчету наличной пропускной способности: утв. ОАО «РЖД» 10 ноября 2010 г. № 128. М.: Техинформ, 2011. 290 с.
3. Пехтерев Ф. С. Количественная оценка перевозочного потенциала железных дорог // Экономика железных дорог. 2012. № 7. С. 22–29.
4. Левин Д. Ю., Павлов В. Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. 364 с.
5. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов. М.: Транспорт, 1968. 112 с.
6. Сотников Е. А., Шенфельд К. П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на требуемую пропускную способность // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2011. № 5. С. 3–9.
7. Организация движения на железнодорожном транспорте / В. В. Повороженко [и др.]; под ред. В. В. Повороженко. М.: Транспорт, 1957. 364 с.
8. Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: Интекст, 2012. 55 с.
9. Мугинштейн Л. А., Анфиногенов А. Ю., Кирякин В. Ю. Оценка пропускной способности участков железных дорог на основе имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт на современном этапе: сб. тр. ученых АО «ВНИИЖТ» / под ред. Б. М. Лapidуса, Г. В. Гогричиани. М.: ВМГ-Принт, 2014. С. 45–50.
10. Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог / М. И. Мехедов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 1. С. 4–12. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>.
11. Патент № 2297353 Российская Федерация, МПК B61L 27/00 (2006.01). Способ имитационного моделирования поездопотока по участку железной дороги: № 2005127976/11: заявл. 08.09.2005; опубл. 20.04.2007 / Мугинштейн Л. А. [и др.]. 11 с.
12. Правила тяговых расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867р. М.: ОАО «РЖД», 2016. 515 с.
13. Методика сравнительной оценки энергоемкости перевозочного процесса в границах железных дорог [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17 декабря 2015 г. № 2983р. 60 с. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

REFERENCES

1. Muginshteyn L. A., Vinogradov S. A., Kiryakin V. Yu., et al. Polygonnye tekhnologii dvizheniya poezdov po grafikam na osnove avtomatizirovannoy sistemy "El'brus" [Polygon technologies of train operation according to schedules based on the automated system "Elbrus"]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2015;(3):13–19. (In Russ.).
2. Instruksiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti: utv. ОАО «RZhD» 10 noyabrya 2010 g. № 128 [Instructions for calculating available capacity: approved by JSC Russian Railways November 10, 2010 No. 128]. Moscow: Tekhinform Publ.; 2011. 290 p. (In Russ.).
3. Pekhterev F. S. Kolichestvennaya otsenka perevochnogo potentsiala zheleznikh dorog [Quantitative assessment of the transportation potential of railways]. *Ekonomika zheleznikh dorog = The Railway Economics magazine*. 2012;(7):22–29. (In Russ.).

4. Levin D. Yu., Pavlov V. L. Raschet i ispol'zovanie propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog: monografiya [Calculation and use of railway capacity: Monograph]. Moscow: Ucheb.-metod. tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte [Educational and methodological center for education in railway transport] Publ.; 2011. 364 p. (In Russ.).

5. Ugryumov A. K. Neravnomernost' dvizheniya poezdov [Uneven motion of trains]. Moscow: Transport Publ.; 1968. 112 p. (In Russ.).

6. Sotnikov E. A., Shenfel'd K. P. Neravnomernost' gruzovykh perevozok v sovremennykh usloviyakh i ee vliyanie na potrebnuyu propusknuyu sposobnost' [Uneven freight traffic in modern conditions and its impact on the required capacity]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2011;(5):3–9. (In Russ.).

7. Povorozhenko V. V., Petrishin L. L., Stefanov N. Ya., et al. Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte [Organization of traffic in railway transport]. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1957. 364 p. (In Russ.).

8. Muginshteyn L. A., Anfinogenov A. Yu., Kiryakin V. Yu., et al. Imitatsionnoe modelirovaniye v zadachakh organizatsii dvizheniya poezdov: sb. tr. uchenykh OAO "VNIIZhT" [Simulation modeling in the problems of organizing train traffic: Coll. of works by scientists of JSC "VNIIZhT"]. Moscow: Intext Publ.; 2012. 55 p. (In Russ.).

9. Muginshteyn L. A., Anfinogenov A. Yu., Kiryakin V. Yu. Otsenka propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznikh dorog na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Evaluation of the capacity of railway sections based on modeling]. *Zheleznodorozhnyy transport na sovremennom etape: sb. tr. uchenykh AO "VNIIZhT" / pod red. B. M. Lapidusa, G. V. Gogrichiani* [Railway transport at the present stage: Coll. of works by scientists of JSC "VNIIZhT", ed. by B. M. Lapidus, G. V. Gogrichiani]. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. P. 45–50. (In Russ.).

10. Mehedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., et al. Optimizatsiya usloviy organizatsii dvizheniya soedinnennykh poezdov na postoyannoy osnove na Transsibirskoy magistrali Vostochnogo poligona seti zheleznikh dorog [Condition optimization for organizing the operation of connected trains on an ongoing basis on the Trans-Siberian Railway of the Eastern operational range of the railway network]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2021;80(1):4–12. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>. (In Russ.).

11. Muginstein L. A., Anfinogenov A. Yu., Kiryakin V. Yu., et al. Sposob imitatsionnogo modelirovaniya poezdopotoka po uchastku zheleznoy dorogi [Method for simulating train flow along a railway section]. Patent No. 2297353 Rossiyskaya Federatsiya [Russian Federation], MPK B61L 27/00 (2006.01), publ. 20.04.2007. 11 p. (In Russ.).

12. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 12 maya 2016 g. № 867r [Rules for traction calculations for train operation: approved by Order of JSC Russian Railways dated May 12, 2016 No. 867r]. Moscow: OAO "RZhD" Publ.; 2016. 515 p. (In Russ.).

13. Metodika sravnitel'noy otsenki energoemkosti perevozhnogo protsessa v granitsakh zheleznikh dorog: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 17 dekabrya 2015 g. № 2983r. [Methodology for comparative assessment of the energy intensity of the transportation process within the boundaries of railways: approved by Order of JSC Russian Railways dated December 17, 2015 No. 2983r]. 60 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО, ведущий технолог, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Михаил Иванович МЕХЕДОВ,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natal'ya V. KORNIENKO,

Leading Technologist, Research Center "Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies", JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

Mikhail I. MEKHEDOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Deputy General Director, Director of the Research Center "Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies", JSC "VNIIZhT", AuthorID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Наталья Владимировна КОРНИЕНКО. Обзор существующих методов расчета пропускной способности, подготовка и описание исходных данных для выполнения расчетов пропускной способности аналитическим методом и посредством имитационного моделирования, выполнение расчетов аналитическим методом, а также моделирования вариантных графиков движения поездов в автоматизированной системе АС ЭЛБРУС-РПС, сравнительный анализ полученных результатов, выводы (70%).

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследования (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Natal'ya V. KORNIENKO. Review of existing methods for calculating capacity, preparation and description of initial data for performing capacity calculations by the analytical method and through simulation modeling, performing calculations by the analytical method, as well as modeling variant graphs of train traffic in the automated system AS ELBRUS-RPS, comparative analysis of the results obtained, conclusions (70%).

Mikhail I. MEKHEDOV. Formation of the direction of research, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm (30%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 12.01.2022, первая рецензия получена 21.01.2022, вторая рецензия получена 02.02.2022, принята к публикации 16.02.2022.

The article was submitted 12.01.2022, first review received 21.01.2022, second review received 02.02.2022, accepted for publication 16.02.2022.



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

УДК 656.072:656.222.5

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-71-79



РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ РАСПИСАНИЙ ПАССАЖИРСКИХ И ПРИГОРОДНЫХ ПОЕЗДОВ: ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, Е. А. Мехедова ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применяемая в настоящее время на железнодорожном транспорте России система учета выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов в недостаточной степени учитывает условия удовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг. Предлагается рассмотреть целесообразность дополнения существующего метода оценки выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов, основанной на учете своевременности прибытия (отправления, проследования) каждого поезда, с принятием во внимание оценки удовлетворенности пассажиров фактически достигаемым уровнем выполнения расписаний.

Материалы и методы. Для решения поставленного вопроса предлагается понятие «уровень неудовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг в части выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов» (или «уровень неудовлетворенности пассажиров качеством выполнения расписаний»). Пассажирские и пригородные поезда при отклонении от расписаний должны иметь оценку согласно используемому понятию в виде весового коэффициента значимости. При определении его численного значения необходимо учитывать количество пассажиров (населенность) поезда, продолжительность опоздания, а также факторы, отражающие цели поездок пассажиров и технологические условия следования поездов.

Результаты. Установлен функционал определения численного значения для опаздывающих пассажирских и пригородных поездов. В расчете определяется исходное значение, учитывающее населенность поезда и время его опоздания, устанавливается соответствующий коэффициент увеличения уровня неудовлетворенности пассажиров. Определены требования к выполнению исследований, связанных с решением вопросов оценки психологической чувствительности пассажиров к опозданиям поездов. Разработанная постановка задачи развития системы оценки качества выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов может быть положена в основу проведения необходимых исследований по этому вопросу.

Обсуждение и заключение. Решение заявленной проблемы важно как для более полного соблюдения интересов пассажиров при поездках в пассажирских (пригородных) поездах, так и для поддержания и повышения имиджа железнодорожного транспорта и, соответственно, его конкурентоспособности на рынке транспортных услуг, а также для минимизации потерь в грузовом движении при обеспечении ввода пассажирских и пригородных поездов в график.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирские перевозки, опоздания пассажирских поездов, цели поездок, удовлетворенность пассажиров перевозкой, факторы, весовые коэффициенты значимости

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

Для цитирования: Мехедов М. И., Сотников Е. А., Мехедова Е. А. Развитие системы оценки качества выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов: постановка вопроса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 71–79. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-71-79>.



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.072:656.222.5

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-71-79



DEVELOPMENT OF THE QUALITY ASSESSMENT SYSTEM OF PASSENGER AND SUBURBAN TRAIN TRAFFIC: RAISING AN ISSUE

Mikhail I. Mekhedov, Evgeniy A. Sotnikov, Evgeniya A. Mekhedova ✉

Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The currently applied system of passenger and suburban train traffic in the Russian railway transport does not completely consider the passenger satisfaction of the provided service quality. The authors suggest determining whether supplements of the existing quality assessment method of passenger and suburban traffic are reasonable in terms of the arrival, departure, running schedule and considering the passenger satisfaction of the existing train traffic.

Materials and methods. The researches proposed the concept of “passenger dissatisfaction of the provided service quality in terms of passenger and suburban train traffic” (or “rate of passenger dissatisfaction of the train schedule implementation”). The passenger and suburban trains with the schedule deflection should be rated by the weighting coefficient of significance. It is necessary to consider not only train capacity and delay duration, but also the purposes of the trip and technological factors of the train running.

Results. The authors determine the numerical value functional of the delayed passenger and suburban trains. Moreover, the authors identify both the initial value of the train capacity and the train delay and the corresponding coefficient of the passenger dissatisfaction growth. The article presents requirements to the studies concerning the rate of passenger psychological sensitivity to the train delays. The developed model allows conducting the necessary research for the quality assessment system of passenger and suburban train traffic.

Discussion and conclusion. The solution of the presented problem is important both for the protection of passenger interests and for maintenance and improving of the railway transport image. In addition, the detailed solution will minimize losses in goods traffic while passenger and suburban train commitment to timetable.

KEYWORDS: passenger transportation, passenger train delays, purpose of the trip, passenger transportation satisfaction, factors, weighting coefficient of significance

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

For citation: Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Mekhedova E. A. Development of the quality assessment system of passenger and suburban train traffic: raising an issue. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1):71–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-71-79>.

Введение. Существующая система оценки выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов основана на учете своевременности прибытия, отправления, проследования каждого поезда и выполнения при этом сетевых нормативов, например показателя уровня выполнения расписаний по отправлению и проследованию пассажирских и пригородных поездов [1]. На сети железных дорог России уровень выполнения расписаний не достигает 100 % и в среднем за 2014–2019 гг. составил в пассажирском движении: по отправлению — 99,3 %, по проследованию — 98,2 %; в пригородном движении: по отправлению — 99,4 %, по проследованию — 98,3 % [2]. Разработаны методики расчета минимально допустимых уровней выполнения расписаний. В то же время имидж ОАО «РЖД» как компании, осуществляющей пассажирские перевозки, зависит не столько от уровня выполнения расписаний, сколько от того, как отклонение от расписания воспринимается самими пассажирами.

Цель работы — рассмотреть пути развития системы оценки качества выполнения расписаний, которая должна быть основана на использовании условия удовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг [3], и предложить формулировку научной задачи, чтобы определить круг необходимых для ее решения исследований.

Понятие «уровень удовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг» используется при определении численного значения сводного индекса удовлетворенности пассажиров суммарно по показателям: время в пути, безопасность перевозок, комфорт, доступность, надежность, стоимость проезда и др. [4, 5, 6].

Для количественной оценки показателя «уровень выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов», определяемого не только по своевременности их прибытия, более целесообразно использовать понятие «уровень неудовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг». В этом случае при нулевом опоздании и уровень неудовлетворенности пассажиров равен нулю. С увеличением времени опоздания уровень неудовлетворенности пассажиров будет расти. Поэтому в представленном ниже анализе используется понятие «уровень неудовлетворенности пассажиров качеством выполнения расписаний».

Для обеспечения соблюдения расписаний поездов сегодня широко используются имитационное моделирование [7], программные комплексы [8], цифровые технологии, нормирование ресурсов (в том числе трудовых) [9]. Тем не менее данная задача в полной мере еще не решена. Отклонения от расписаний имеют место по различным причинам [10]: отказы в ра-

боте технических средств и нарушения безопасности движения, погодные условия, влияние задержек грузовых поездов при их обращении по одним и тем же линиям с пассажирскими поездами и др. Вследствие этого расписания пассажирских и пригородных поездов на региональном и сетевом уровнях выполняются, как правило, менее чем на 100 %.

В настоящее время каждый опоздавший поезд при оценке выполнения расписаний принимается за единицу в общем числе отправленных, проследовавших или прибывших поездов, что с позиции удовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг железнодорожным транспортом нельзя признать правильным.

Действительно, чем больше пассажиров проследовало в опоздавшем (отправленном, проследовавшем или прибывшем) поезде, тем выше общая неудовлетворенность пассажиров. В этом смысле опоздания двух поездов, в которых было перевезено, например, в первом 500, а во втором 150 пассажиров, нельзя признать равноценными при оценке качества предоставляемых услуг. Очевидно, что количество пассажиров в первом поезде, неудовлетворенных работой железнодорожного транспорта, может быть существенно большим, чем количество таких пассажиров во втором поезде.

Одинаковые оценки двух рассмотренных в примере поездов являются ошибочными и для самой пассажирской железнодорожной компании. Чем выше неудовлетворенность пассажиров и число претензий к работе такой компании, тем ниже имидж железнодорожного транспорта [11] и, соответственно, его способность успешной работы в конкурентной среде пассажирских перевозок. При систематических опозданиях это может проявляться, например, в виде оттока пассажиров от поездов железнодорожным транспортом. Для пассажирской компании при наличии альтернативы выбора меньший урон ее имиджу и конкурентоспособности может принести опоздание второго поезда, в котором следует только 150 пассажиров.

Условия неудовлетворенности пассажиров связаны не только с их количеством в различных поездах. Например, если в одном из поездов (поезд А) большинство пассажиров следует к определенному времени на работу, как это имеет место в утренних пригородных поездах, а в другом (поезд Б) — с другими целями, которые не требуют высокой точности времени прибытия поезда на станцию назначения, то при одинаковом количестве пассажиров в поездах опоздание поезда А окажет большее влияние на неудовлетворенность пассажиров качеством предоставленных услуг. Соответствующее воздействие будет оказано и на изменение имиджа и конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

Дифференциация значимости выполнения расписаний различных пассажирских и пригородных поездов также имеет значение для обеспечения выполнения нормативной технологии работы с составами поездов на станциях их оборота [12]. Нарушения выполнения расписаний влекут за собой и нарушения технологии работы станций, вокзалов, локомотивных, вагонных и моторвагонных депо, что приводит к дополнительным затратам, связанным с пассажирскими перевозками. В худших случаях это вызывает опоздания отправляющихся по обороту поездов и даже привлечение дополнительного подвижного состава с соответствующими затратами. Во многом такие последствия связаны с величиной резерва времени в периоде от прибытия до отправления поездов по обороту. Чем больше такой период и меньше время опоздания поездов, тем меньше потери пассажирских компаний.

Необходимо также учитывать условия работы участков и станций при поступлении на них опаздывающих поездов. На загруженных линиях пропуск опаздывающего поезда может вызвать существенный сбой в общем проследовании по участку не только грузовых, но также пассажирских и пригородных поездов. То же относится и к работе загруженных пассажирских станций.

Порядок расчета весового коэффициента значимости $K_{\text{зн}}$. Целесообразно, чтобы пассажирские и пригородные поезда имели некоторую оценку по значимости с точки зрения возможной неудовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг, а также нормативной технологии пассажирских перевозок. Обозначим численное значение такой оценки весовым коэффициентом значимости выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов $K_{\text{зн}}$ (далее — весовой коэффициент значимости) [3]. Чем выше у i -го опаздывающего поезда этот коэффициент ($K_{\text{зн}i}$), тем больший ущерб наносится имиджу пассажирской компании и, соответственно, тем более высокие требования должны предъявляться к персоналу железных дорог по обеспечению выполнения расписания такого поезда.

Практическое использование весовых коэффициентов значимости пассажирских и пригородных поездов заключается в следующем:

- при возникновении затрудненных ситуаций [13] в эксплуатационной работе и наличии нескольких вариантов пропуска как не опаздывающих, так и опаздывающих пассажирских и пригородных поездов следует выбирать тот из них, при котором в конечном итоге суммарная оценка весовых коэффициентов значимости $K_{\text{зн}}$ стремится к минимуму (1):

$$\sum_{i=1}^n K_{\text{зн}i}^{\text{кон}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где n — количество пассажирских и пригородных поездов, рассматриваемых в вариантах выхода из за-

трудненной ситуации в эксплуатационной работе; $K_{\text{зн}i}^{\text{кон}}$ — конечные весовые коэффициенты пассажирских и пригородных поездов после преодоления затрудненной ситуации.

То же относится к выполнению нагонов расписаний опаздывающими пассажирскими и пригородными поездами с учетом их пропуска по всем участкам и станциям следования;

- при пассажирских и грузовых перевозках, осуществляемых по одним и тем же линиям, перед дежурным персоналом (поездные диспетчеры, дежурные по станции) нередко возникает задача оценки риска возникновения нарушения расписаний пассажирских и пригородных поездов при том или ином варианте следования грузовых поездов по участкам и выполнении маневровой работы на станциях. Такие ситуации возникают, например, при выборе поездным диспетчером времени отправления поезда со станции или определения отдельного пункта обгона грузового поезда пассажирским [14]. На станциях это связано с определением времени окончания маневровой работы на маневровых маршрутах, в которых используются изолированные секции поездных маршрутов прибывающих (отправляющихся) поездов. При оценке таких рисков дежурный персонал должен учитывать влияние возможности опозданий пассажирских (пригородных) поездов при ошибочном решении на увеличение значений весовых коэффициентов значимости различных поездов;

- необходимо рассмотреть вопрос о нормировании уровня выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов ($\gamma_{\text{пасс}}$, $\gamma_{\text{приг}}$) и учета их выполнения не только по количеству проследовавших по расписанию поездов, но и по количеству таких поездов с учетом их весовых коэффициентов значимости. Такой подход более достоверно отражает качество выполнения расписаний исходя из интересов как пассажиров, так и пассажирских компаний. Для опаздывающих поездов в весовом коэффициенте значимости прежде всего следует учитывать продолжительность опоздания, поскольку чем больше опоздание, тем выше неудовлетворенность пассажиров качеством предоставляемых услуг. Увеличиваются также неблагоприятные последствия для нормативной работы станций и депо в пунктах оборота.

На рисунке представлена общая схема определения и практического использования $K_{\text{зн}i}$.

Методические положения определения численных значений $K_{\text{зн}i}$, а также уровня выполнения расписаний $\gamma_{\text{пасс}}$, $\gamma_{\text{приг}}$. Прежде всего отметим, что опоздание любого поезда вызывает неудовлетворенность пассажиров качеством предоставляемых услуг: чем больше пассажиров следует в поезде, тем выше может быть общий уровень неудовлетворенности выполнением расписания. Соответственно, при расчете значения $K_{\text{зн}i}$ необходимо учитывать населенность поезда $Q_{\text{ни}}$.

Аналогично влияние и продолжительности опозданий $t_{оп}$: чем больше величина $t_{оп}$, тем больше и уровень неудовлетворенности пассажиров поездкой. Величина $t_{оп}$ должна учитываться при определении $K_{зн}$ опаздывающего поезда.

В то же время для поездок, выполняемых с некоторыми конкретными целями, опоздания поездов дополнительно увеличивают уровень неудовлетворенности пассажиров. Определим такие цели поездок как факторы влияния на численные значения $K_{зн}$. Такими факторами (группа целевых факторов x_i) являются:

- следование к месту работы с точным временем начала рабочего дня (например, следование пассажиров в пригородных поездах в утренние часы) — фактор x_1 ;
- следование пассажиров на деловую встречу — фактор x_2 ;
- следование пассажиров по мультимодальному маршруту [15], включающему несколько видов транспорта с согласованными расписаниями пересадок — фактор x_3 : поезд — автотранспорт; поезд — авиатранспорт; поезд — речной (морской) транспорт (часто туристические поездки);
- следование пассажиров к месту отдыха с согласованным принимающей стороной временем прибытия — фактор x_4 ;
- следование пассажиров в поездах, прибывающих поздно вечером на станцию назначения; в этом случае одной из составляющих общей цели поездки пассажира является прибытие не позднее времени окончания работы местного транспорта (например, метрополитена) — фактор x_5 ;
- следование пассажиров в многократно (систематически) опаздывающих поездах; в этом случае цель поездки срывается неоднократно и с каждой такой поездкой нарастает неудовлетворенность работой железнодорожного транспорта — фактор x_6 .

При опоздании поездов имеется также ряд дополнительных условий (целевой фактор x_7), повышающих действие каждого из факторов $x_1...x_6$:

- выполнение поездки в некомфортных условиях;
- плохие условия пребывания пассажиров на вокзале в ожидании пересадки (недостаточный комфорт, плохое информирование и т. п.).

Фактор x_7 отнесен к группе целевых факторов, поскольку каждый пассажир стремится к лучшим условиям поездки (с учетом имеющихся возможностей).

Таким образом, всего рассматривается семь целевых факторов, $\varphi = 7$.

При определении значений $K_{зн}$ должны учитываться также факторы влияния продолжительности опозданий поездов на технологию работы железных дорог (группа технологических факторов y_i):

- наличие резерва времени в пункте оборота — фактор y_1 .



Если

$$t_{рез}^{об} < t_{оп}, \quad (2)$$

где $t_{оп}$ — величина опоздания поезда по прибытию в пункт оборота; $t_{рез}^{об}$ — время от прибытия поезда до отправления по обороту с исключением из него времени на выполнение технологических операций с составами, то при соблюдении данного неравенства поезда, следующие с составами по обороту, будут отправлены с опозданием, что отразится на увеличении значений их $K_{зн}$;

- возникновение дополнительных затруднений в работе загруженных участков и станций при поступлении на них опаздывающих пассажирских (и/или пригородных) поездов, что может вызвать дополнительные опоздания и рост значений $K_{зн}$, — фактор y_2 .

Следование точно по расписанию некоторых категорий пассажирских и пригородных поездов

имеет особое значение для сохранения имиджа пассажирской компании и ОАО «РЖД» в целом. Для таких поездов требуется особое отношение к расчету значения $K_{\text{зн}i}$. Это поезды [16]:

- высокоскоростные пассажирские (с допустимой скоростью более 200 км/ч);
- скоростные и скорые, в том числе фирменные;
- скорые пригородные.

Целесообразно при сбое в движении для решения вопроса очередности следования выделять такие поезда как внеочередные — фактор z .

Таким образом, функционал определения численного значения $K_{\text{зн}i}$ для опаздывающих поездов имеет вид

$$K_{\text{зн}i} = f(Q_{\text{ни}}, t_{\text{оп}i}, (x_1 \dots x_7), y_1, y_2, z), \quad (3)$$

где $Q_{\text{ни}}$ — населенность i -го поезда; $t_{\text{оп}i}$ — продолжительность опоздания i -го поезда; x_1 — фактор следования пассажиров к месту работы с точным началом рабочего дня; x_2 — фактор следования пассажиров на деловую встречу; x_3 — фактор следования пассажиров в поездах с согласованным временем пересадки при мультимодальной поездке; x_4 — фактор следования пассажиров к месту отдыха с согласованным принимающей стороной временем прибытия; x_5 — фактор следования пассажиров в поездах, прибывающих на конечную станцию поздно вечером; x_6 — фактор следования пассажиров в неоднократно опаздывающих поездах; x_7 — фактор учета дополнительных условий, повышающих действие факторов $x_1 \dots x_6$; y_1 — фактор наличия резерва времени в пункте оборота составов; y_2 — фактор влияния опаздывающего поезда на пропуск поездов по участкам и станциям; z — фактор особой значимости для имиджа ОАО «РЖД» выполнения расписаний некоторых категорий пассажирских и пригородных поездов.

Размерность величины $K_{\text{зн}i}$ принципиально не имеет значения. Важно только, чтобы численные значения $K_{\text{зн}i}$ разных поездов соответствовали общему уровню неудовлетворенности пассажиров каждого поезда. Это позволит ранжировать поезда по данному показателю, выполнять логические действия и производить вычисления, например, по формуле (1) для решения задач определения очередности следования и выполнения нагона расписаний пассажирскими (пригородными) поездами при возникновении затруднений в эксплуатационной работе.

В функционале (3) на основе использования составляющих $Q_{\text{ни}}$ и $t_{\text{оп}i}$ может быть определена некоторая исходная величина, используемая для дальнейших расчетов, — $K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}$:

$$K_{\text{зн}i}^{\text{исх}} = f(Q_{\text{ни}}, t_{\text{оп}i}). \quad (4)$$

При линейной зависимости от продолжительности опоздания $t_{\text{оп}i}$ величина $K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}$ может определяться как

$$K_{\text{зн}i}^{\text{исх}} = Q_{\text{ни}} t_{\text{оп}i}. \quad (5)$$

Однако если при выполнении дополнительных исследований функции (4) будет установлена ее нелинейность, для определения значения $K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}$ потребуется установить ее вид.

В i -м поезде (всего пассажиров) могут следовать пассажиры с одной или несколькими целями (факторы x_j). Влияние этих факторов следует учитывать при оценке уровня неудовлетворенности пассажиров в случае опоздания поезда.

Переход от значений $K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}$ к значениям $K_{\text{зн}i}$ с учетом факторов x_j выполняется на основании следующего функционала:

$$K_{\text{зн}i} = f(K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}, d_{ij}, e_{it}), \quad (6)$$

где d_{ij} — коэффициент увеличения уровня неудовлетворенности пассажиров, следующих в i -м поезде, за счет воздействия целевых факторов x_j , т. е. $x_1 \dots x_7$ (всего семь факторов); $j = 1, 2, \dots, \varphi$; $\varphi = 7$; e_{it} — коэффициент увеличения уровня неудовлетворенности пассажиров, следующих в i -м поезде, за счет воздействия технологических факторов y_t , т. е. y_1, y_2 (всего 2 фактора).

Фактор z в функционале (6) не используется, поскольку этот фактор относится к категориям внеочередных поездов, при которых в данных расчетах величина $K_{\text{зн}i}$ не учитывается.

Значение $K_{\text{зн}i}^{\text{исх}}$ используется для определения значения $K_{\text{зн}i}$ для всех поездов, кроме поездов, отнесенных к категории особой значимости (фактор z). Остальные составляющие функционала (6) индивидуальные для каждого поезда.

Порядок определения коэффициента d_{ij} . Прежде всего на основе изучения влияния факторов x_j на изменение психологического состояния пассажиров необходимо определить их численные относительные (весовые) значения по отношению друг к другу, т. е. насколько при опоздании поездов возрастает уровень неудовлетворенности пассажиров, следующих с целями согласно факторам $x_1 \dots x_7$.

Предположим, например, что для пассажиров, следующих с целью, отражаемой фактором x_3 (согласованное время пересадки), на основании исследования установлено ухудшение их психологического состояния при опоздании поезда на 30 % (или в 1,3 раза) по сравнению с пассажирами, следующими без цели, отражаемой фактором x_3 . Тогда относительное значение влияния фактора x_3 на увеличение уровня неудовлетворенности пассажиров (обозначим его β_3) равно 1,3, т. е. $\beta_3 = 1,3$. Для x_j -й цели поездки это β_j . Величина β_j учитывается для доли пассажиров в i -м поезде, следующих в примере с целью x_3 . Обозначим такую долю α_{i3} .

$$\alpha_{i3} = \frac{Q_{ni3}}{Q_{ni}},$$

где Q_{ni3} — количество пассажиров, следующих в i -м поезде с целью x_3 .

В общем виде доля пассажиров при поездке в i -м поезде с x_j -й целью определяется по формуле

$$\alpha_{ij} = \frac{Q_{nij}}{Q_{ni}}, \quad (7)$$

где Q_{nij} — количество пассажиров, следующих в i -м поезде с x_j -й целью.

Коэффициент увеличения неудовлетворенности пассажиров, следующих в i -м поезде с x_j -й целью, составит (при общем количестве целевых факторов φ)

$$d_{ij} = \alpha_{ij} \beta_j, \quad (8)$$

где β_j — относительное значение влияния фактора j на увеличение уровня неудовлетворенности пассажиров.

В одном пассажирском (пригородном) поезде могут следовать пассажиры с различными целями x_j . Например, для части пассажиров из общего их числа Q_{ni} станция прибытия может быть станцией пересадки на другой вид транспорта, еще для одной части — конечным пунктом прибытия к месту отдыха, часть пассажиров может следовать на деловую встречу и т. д. С учетом всех целей формула определения коэффициента увеличения неудовлетворенности пассажиров имеет следующий вид:

$$d_{ij}^{(\varphi)} = \sum_{j=1}^{\varphi} \alpha_{ij} \beta_j. \quad (9)$$

Если в поезде отсутствуют пассажиры, следующие с одной из φ целей, то для такой категории пассажиров α_{ij} и, соответственно, d_{ij} равны нулю, т. е. имеет место нулевое влияние такого фактора на увеличение общей неудовлетворенности пассажиров поезда.

Тогда величина K_{zni} с учетом всех φ целей поездок пассажиров может определяться по формуле

$$K_{zni} = K_{zni}^{исх} (1 + d_{ij}^{(\varphi)}). \quad (10)$$

Коэффициент e_{ic} (e_{i1}, e_{i2}) в функционале (6) используется для определения количества i -х пассажирских и пригородных поездов, для которых рассчитываются значения K_{zni} .

При этом коэффициент e_{i1} относится к поездам, опаздывающим при отправлении по обороту (фактор y_1), а коэффициент e_{i2} — к поездам, задерживаемым при затруднениях в эксплуатационной работе (фактор y_2).

В результате в функционале (3) величина K_{zni} представляет собой некоторое число, индивидуальное для каждого пассажирского или пригородного поезда, от-

ражающее общий уровень неудовлетворенности пассажиров, следующих в i -м опаздывающем пассажирском (пригородном) поезде.

Уровень неудовлетворенности пассажиров, следующих в опаздывающих пассажирских (пригородных) поездах, рассчитывается по формуле

$$K_{zni}^m = \sum_{i=1}^m K_{zni}, \quad (11)$$

где m — число опаздывающих пассажирских (пригородных) поездов.

Разработка методики определения значения K_{zni} и K_{zni}^m требует выполнения дополнительных самостоятельных исследований, связанных с решением следующих вопросов:

- оценка психологической чувствительности пассажиров к опозданиям поездов (в том числе при отмене рейсов) по рассмотренным факторам (т. е. определение численных значений коэффициента d_{ij});
- определение значений Q_{ni} , учитываемых при расчете K_{zni} ; значений Q_{nij} , учитываемых при расчете α_{ij} ; значений e_{i1} , e_{i2} , используемых для определения количества поездов, задерживаемых по обороту, а также вследствие возможных эксплуатационных затруднений;
- разработка порядка использования имеющейся информации о продаже билетов, а также условий проведения натурных статистических наблюдений для определения значений Q_{ni} и Q_{nij} ;
- разработка порядка выполнения экспертных оценок для определения исходных данных расчета;
- методическое обеспечение условий использования значений K_{zni} и K_{zni}^m применительно к практической организации пропуска пассажирских и пригородных поездов при затруднениях в эксплуатационной работе;
- определение порядка расчета численных значений K_{zni} и K_{zni}^m при оценке рисков опозданий поездов дежурным персоналом и нормировании показателей уровня выполнения расписаний.

Следует отметить, что поскольку при решении поставленных вопросов необходимо оценивать воздействие отклонений от расписаний на психологическое состояние пассажиров в разных условиях, то к таким исследованиям должны привлекаться профессиональные психологи.

Обсуждение и заключение. Существующая система учета выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов в недостаточной степени учитывает условия удовлетворенности пассажиров качеством предоставляемых услуг. Выполнение таких условий имеет важное значение для поддержания имиджа пассажирских компаний и железнодорожного транспорта в целом, а соответственно, и их конкурентоспособности. Разработана постановка задачи развития системы оценки качества выполнения расписаний.

Для пассажирских и пригородных поездов предлагается ввести показатель «уровень неудовлетворенности пассажиров качеством выполнения расписаний», численное значение которого определяется индексом «веса коэффициент значимости выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов» — $K_{\text{зн}}$.

Величина $K_{\text{зн}}$ зависит от ряда факторов: населенности поезда, продолжительности опоздания, целей поездок пассажиров — следование к месту работы с точным временем начала рабочего дня, следование по мультимодальному маршруту, поездка на деловую встречу и др. Изложены методы учета предложенных факторов в расчете $K_{\text{зн}}$.

Определены требования к выполнению дополнительных исследований, связанных с решением следующих вопросов: оценка психологической чувствительности пассажиров к опозданиям поездов, определение учитываемого количества пассажиров в опаздывающих поездах, методическое обеспечение условий использования значений $K_{\text{зн}}$ к практической организации работы по пропуску пассажирских и пригородных поездов.

Решение рассмотренной задачи позволит более правильно организовать управление продвижением пассажирских и пригородных поездов при затруднениях в эксплуатационной работе. Это важно как для более полного, чем это имеет место сегодня, соблюдения интересов пассажиров при поездках в пассажирских (пригородных) поездах, так и для поддержания и дальнейшего повышения имиджа железнодорожного транспорта и, соответственно, его конкурентоспособности на рынке транспортных услуг.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мехедов М. И., Сотников Е. А., Мехедова Е. А. Оценка влияния выполнения графика движения поездов на качество пассажирских перевозок // Железнодорожный транспорт. 2020. № 8. С. 4–8.
2. Мехедова Е. А. Анализ влияния количества остановок пассажирских и пригородных поездов на выполнение графика их движения // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 1. С. 136–155.
3. Оценка точности пассажирских сообщений // Железные дороги мира. 2017. № 11. С. 28–34.
4. Пассажирские и грузовые железнодорожные перевозки: удовлетворенность пользователей (2016–2017) [Электронный ресурс]. URL: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/-passazhirskie-i-gruzovye-zheleznodorozhnye-perevozki-udovletvorennost-polzovatelej-2016-2017> (дата обращения: 19.11.2021).
5. Капелюк З. А., Попова Я. В. Качество железнодорожных транспортных услуг как фактор социально-экономического развития страны // Вестник НГИЭИ. 2021. № 6 (121). С. 58–67.
6. Иванова Е. А. Маркетинг качества обслуживания пассажиров // Мир транспорта. 2016. Т. 17, № 2. С. 102–111.
7. Виноградов С. А., Попов К. М. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 42–45.
8. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу по-

ездов: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн [и др.]. М.: ВМГ-Принт, 2014. 144 с.

9. Обучение машинистов энергосберегающим и безопасным методам управления поездами / Л. А. Мугинштейн [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2005. № 9. С. 37–40.

10. A platform for improved performance // Modern Railways. 2017. Vol. 821. no. 2. P. 6–7.

11. Программа повышения качества транспортного обслуживания пассажиров в 2017–2019 годах [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24 марта 2017 г. № 543р. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218604/2c482fb9189d0362f86cd569d382326833a9f443 (дата обращения: 09.11.2021).

12. Типовой технологический процесс технического обслуживания пассажирских вагонов в пути следования и при отправлении поездов со станций формирования и оборота [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25 марта 2010 г. № 588р. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_239303/bbb6c4fd6c1bb92df83fc7cf8f0a61957eac4d3c (дата обращения: 09.11.2021).

13. Altazin E. La replanification en temps réel de l'exploitation d'une ligne Transilien // Revue générale des Chemins de fer. 2018. Vol. 284. P. 50–56.

14. Ипатов В. В., Иванов М. Т., Грошев Г. М. Совершенствование диспетчерского управления // Железнодорожный транспорт. 1999. № 9. С. 56–59.

15. Роменский Д. Ю., Колин А. В. Проблемы и перспективы развития мультимодальных пассажирских перевозок с использованием железнодорожного транспорта // Транспортное дело России. 2018. № 2. С. 104–107.

16. Порядок назначения и отмены поездов всех категорий на инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования, принадлежащей ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 февраля 2016 г. № 264р. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_252542/a63f7b8dc2dcd1a040cbf781cb949a3f9eaea2a4 (дата обращения: 09.11.2021).

REFERENCES

1. Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Mekhedova E. A. Otsenka vliyaniya vypolneniya grafika dvizheniya poezdov na kachestvo passazhirskikh perevozk [Assessment of the influence of train traffic schedule implementation on the quality of passenger transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2020;(8):4–8. (In Russ.).
2. Mekhedova E. A. Analiz vliyaniya kolichstva ostanovok passazhirskikh i prigorodnykh poezdov na vypolnenie grafika ikh dvizheniya [Analysis of the influence of the number of stops of passenger and commuter trains on the implementation of its operation schedule]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2021;19(1):136–155. (In Russ.).
3. Otsenka tochnosti passazhirskikh soobshcheniy [Assessment of the accuracy of passenger operation]. *Zheleznye dorogi mira = Railways of the World*. 2017;(11):28–34. (In Russ.).
4. Passazhirskie i gruzovye zheleznodorozhnye perevozki: udovletvorennost' pol'zovateley (2016–2017) [Passenger and freight rail transportation: user satisfaction (2016–2017)]. URL: <https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/-passazhirskie-i-gruzovye-zheleznodorozhnye-perevozki-udovletvorennost-polzovatelej-2016-2017> (access date: 19.11.2021). (In Russ.).
5. Kapelyuk Z. A., Popova Ya. V. Kachestvo zheleznodorozhnykh transportnykh uslug kak faktor sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya strany [Quality of railway transport services as a factor in the country's socio-economic development]. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*. 2021;6 (121):58–67. (In Russ.).
6. Ivanova E. A. Marketing kachestva obsluzhivaniya passazhirov [Passenger service quality marketing]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2016;17(2):102–111. (In Russ.).

7. Vinogradov S.A., Popov K.M. Tsifrovye tekhnologii povysheniya energeticheskoy effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozk [Digital technologies for improving the energy efficiency of railway transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2019;(7):42–45. (In Russ.).

8. Muginshteyn L.A., Molchanov A.I., Vinogradov S.A., et al. Sovremennaya metodologiya tekhnicheskogo normirovaniya raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov lokomotivami na tyagu poezdov: sb. tr. uchenykh OAO “VNIIZhT” [Modern methodology of technical regulation of the consumption of fuel and energy resources by locomotives for train traction: Coll. of works by scientists of JSC “VNIIZhT”]. Moscow: VMG-Print Publ.; 2014. 144 p. (In Russ.).

9. Muginshteyn L.A., Yabko I.A., Rakhmaninov V.I., et al. Obucheniye mashinistov energosberegayushchim i bezopasnym metodam upravleniya poezdami [Training of drivers in energy-saving and safe methods of train control]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2005;(9):37–40. (In Russ.).

10. A platform for improved performance. *Modern Railways*. 2017;821(2): 6–7.

11. Programma povysheniya kachestva transportnogo obsluzhivaniya passazhirov v 2017–2019 godakh [The program to improve the quality of passenger transport services in 2017–2019]: utv. rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 24 marta 2017 g. № 543r [approved by Order of JSC Russian Railways dated March 24, 2017 No. 543r]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218604/2c482fb9189d0362f86cd569d382326833a9f443 (access date: 09.11.2021). (In Russ.).

12. Tipovoy tekhnologicheskii protsess tekhnicheskogo obsluzhivaniya passazhirskikh vagonov v puti sledovaniya i pri otpravlenii poezdov so stantsiy formirovaniya i oborota [Typical technological process for the maintenance of passenger cars along the route and when trains depart from the stations of formation and turnover]: utv. rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 25 marta 2010 g. № 588r [approved by Order of JSC Russian Railways dated March 25, 2010 No. 588r]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_239303/bbb6c4fd6c1bb92df83fc7cf8f0a61957eac4d3c (access date: 09.11.2021). (In Russ.).

13. Altazin E. La replanification en temps réel de l’exploitation d’une ligne Transilien. *Revue générale des Chemins de fer*. 2018;(284):50–56.

14. Ipatov V.V., Ivanov M.T., Groshev G.M. Sovershenstvovanie dispetcherskogo upravleniya [Improvement of dispatching control]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 1999;(9):56–59. (In Russ.).

15. Romenskiy D.Yu., Kolin A.V. Problemy i perspektivy razvitiya mul’timodal’nykh passazhirskikh perevozk s ispol’zovaniem zheleznodorozhnogo transporta [Problems and prospects for the development of multimodal passenger transportation using railway transport]. *Transportnoye delo Rossii = Transport business of Russia*. 2018;(2):104–107. (In Russ.).

16. Poryadok naznacheniya i otmeny poezdov vseh kategoriy na infrastrukture zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol’zovaniya, prinallezhashchey OAO “RZhD” [Procedure for the appointment and cancellation of trains of all categories on the infrastructure of public railway transport owned by JSC Russian Railways]: utv. rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 12 fevralya 2016 g. № 264r [approved by Order of JSC Russian Railways dated February 12, 2016 No. 264r]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_252542/a63f7b8dc2dc-d1a040cbf781cb949a3f9eaea2a4 (access date: 09.11.2021). (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения» (НЦ «ЦМПЭ»), АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-2>

Евгений Александрович СОТНИКОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ», AuthorID: 493861

Евгения Александровна МЕХЕДОВА,

ведущий технолог, НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0002-3274-4413>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail I. MEKHEDOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Deputy General Director, Director of the Scientific Center “Digital Transportation Models and Energy Saving Technologies” (SC “TsMPE”), JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-2>

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, JSC “VNIIZhT”, AuthorID: 493861

Evgeniya A. MEKHEDOVA,

Leading Technologist, SC “TsMPE”, JSC “VNIIZhT”, <https://orcid.org/0000-0002-3274-4413>

ВКЛАД АВТОРОВ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Формирование направления исследовательской деятельности (20 %).

Евгений Александрович СОТНИКОВ. Формулировка цели и задачи исследования, формирование методологии исследования (40 %).

Евгения Александровна МЕХЕДОВА. Формулировка новизны исследования, формирование и описание материалов (40 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Mikhail I. MEKHEDOV. Formation of the research course (20 %).

Evgeniy A. SOTNIKOV. Formulation of the purpose and objectives of the study, formation of the research methodology (40 %).

Evgeniya A. MEKHEDOVA. Formulation of the novelty of the research, the formation and description of materials (40 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 09.12.2021, первая рецензия получена 17.12.2021, вторая рецензия получена 21.12.2021, принята к публикации 01.02.2022.

The article was submitted 09.12.2021, first review received 17.12.2021, second review received 21.12.2021, accepted for publication 01.02.2022.

Научная статья

УДК 625.143:625.142

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-80-88



МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Е. Н. Ефимова¹, Н. П. Виногоров¹, А. А. Шиладжян¹,
В. М. Кошелев¹✉, Д. А. Валов¹, Н. В. Кузнецова²

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

² Российская открытая академия транспорта (РОАТ)
Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена методическим подходам к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути. Целью работы является разработка методических подходов к оценке эффективности применения материалов верхнего строения пути — рельсов, креплений, шпал, балласта — в заданных условиях эксплуатации.

Материалы и методы. Представлены разработанные авторами методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути, базирующиеся на принципах оценки стоимости жизненного цикла сложных технических систем железнодорожного транспорта. Методические подходы позволяют учесть в стоимости жизненного цикла все затраты, связанные с приобретением, владением и утилизацией материалов верхнего строения рассматриваемых участков железнодорожного пути с приведением стоимостных показателей к ценности начального периода путем дисконтирования рассматриваемых экономических показателей.

Результаты. Приведены результаты тестовых расчетов оценки эффективности использования рельсовых креплений типа ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65Ш, АРС-4, Фоссло W-30 на условном 12-километровом участке железнодорожного бесстыкового пути с рельсами ДТ350 и грузонапряженностью 80 млн т·км брутто/км в год. Наиболее эффективным вариантом конструкции верхнего строения пути признается вариант, имеющий наименьшее значение удельных затрат на 1 т·км брутто, образующихся за весь жизненный цикл функционирования участка железнодорожного пути.

Обсуждение и заключение. Разработанные методические подходы могут быть использованы для оценки, сравнения и выбора наиболее эффективно функционирующих конструкций верхнего строения пути в заданных условиях эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, рельсы, рельсовые крепления, стоимость жизненного цикла, текущее содержание пути, материалы верхнего строения пути, утилизация

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

Для цитирования: Ефимова Е. Н., Виногоров Н. П., Шиладжян А. А., Кошелев В. М., Валов Д. А., Кузнецова Н. В. Методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 1. С. 80–88. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-80-88>.

Original article

UDK 625.143:625.142

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-1-80-88



METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE EFFICIENT FUNCTIONING ASSESSMENT OF THE MODERN UPPER STRUCTURE TRACK

Elena N. Efimova¹, Nikolay P. Vinogorov¹, Alla A. Shiladzhyan¹,
Vladimir M. Koshelev¹✉, Dmitriy A. Valov¹, Natal'ya V. Kuznetsova²

¹Railway Research Institute (VNIIZhT),
Moscow, Russian Federation

²Russian Open Academy of Transport (ROAT)
of the Russian University of Transport (RUT (MIIT),
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article covers the approaches to assessing the efficient functioning of the modern upper structure track and aims at developing these approaches in the process of using the track superstructure materials — rails, fasteners, sleepers, ballast — under given operating conditions.

Materials and methods. The authors proposed methodological approaches for assessing the effective functioning of the modern upper structure track. These methods were based on the life cycle cost measurements of railway complex technical systems. The methodological approaches enable to consider the expenditures for the acquisition, possession and disposal of the upper structure track materials by discounting the cost indicators and the initial period value.

Results. The authors present the results of test calculations for assessing the effective use of ZhBR-65PSHM, ZhBR-65Sh, ARS-4, Vossloh W-30 rail fasteners types on a 12-kilometer nominal section of the continuous welded rail with DT350 rails and a traffic density up to 80 t.km gross/km per year. The most efficient upper structure track option is the one, which has the lowest value of unit costs per 1 t.km gross and covers the full life cycle of the railway track section operation.

Discussion and conclusion. The developed methodological approaches will be used to evaluate, compare and select the most efficient upper structure track schemes under given operating conditions.

KEYWORDS: railway track, rails, rail fasteners, life cycle cost, track maintenance, upper structure track materials, recycling

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

For citation: Efimova E. N., Vinogorov N. P., Shiladzhyan A. A., Koshelev V. M., Valov D. A., Kuznetsova N. V. Methodological approaches to the efficient functioning assessment of the modern upper structure track. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(1): 80–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-1-80-88>.

Введение. Сочетание многообразия специализаций и категорий рельсов с различными скреплениями позволяет создавать множество вариантов конструкций верхнего строения пути, обеспечивающих выполнение установленного объема перевозок и их безопасности. Эти варианты отличаются стоимостью материалов и эксплуатационными затратами.

В [1] и [2] была предпринята попытка определить сравнительную эффективность функционирования различных конструкций рельсовых скреплений, применяемых в путевом хозяйстве на сети железных дорог. В то же время можно отметить, что методика расчета стоимости жизненного цикла 1 км железнодорожного пути [1] основана на использовании калькуляции фактически произведенных затрат и не позволяет оценить и смоделировать изменение затрат на текущее содержание пути в зависимости от пропущенного тоннажа, скорости движения грузовых поездов, типа используемых рельсов и особенностей климатических условий эксплуатации железнодорожного пути.

В ряде других публикаций представлена методология оценки стоимости жизненного цикла для оптимизации технического обслуживания верхнего строения железнодорожного пути [3] и определения минимальной стоимости межремонтного цикла как критерия выбора оптимальной конструкции верхнего строения пути для функционирования в заданных условиях эксплуатации [4]. Однако представленные подходы [1–4] не учитывают все затраты, в частности связанные с налоговыми и страховыми платежами. Кроме того, в них не учитывается изменение финансовых потоков в зависимости от фактора времени, т. е. коэффициент дисконтирования приведенных затрат не используется.

В ОАО «РЖД» для обоснования закупки новой, в том числе инновационной, высокотехнологичной продукции применяется методология оценки стоимости жизненного цикла [5, 6]. Эти же методы применяют и для оценки эффективности функционирования уже используемых технических систем. Разработанные и приведенные в настоящей статье методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути содержат описание математической модели расчета стоимости жизненного цикла, которая позволяет учесть все затраты, связанные с приобретением, владением и утилизацией рельсошпальной решетки конкретного участка железнодорожного пути.

Определение стоимости жизненного цикла материалов верхнего строения железнодорожного пути. Под жизненным циклом понимается совокупность процессов создания, эксплуатации, ремонта и утилизации единицы подвижного состава или сложной технической системы железнодорожного транспорта.

Под стоимостью жизненного цикла (СЖЦ) понимаются совокупные издержки потребителя на приобретение, использование техники за срок службы и ее изъятие (ликвидация, утилизация).

Применительно к оценке СЖЦ материалов верхнего строения пути модель СЖЦ может быть представлена в виде суммы затрат на приобретение, эксплуатацию и утилизацию:

$$\text{СЖЦ} = C_{\text{пр.}} + C_{\text{экспл.}} + C_{\text{ут.}} \quad (1)$$

где $C_{\text{пр.}}$ — расходы, связанные с приобретением, принимаются равными стоимости капитального ремонта участка железнодорожного пути ($C_{\text{кап.рем.}}$); $C_{\text{экспл.}}$ — суммарные расходы на все виды промежуточных ремонтов и текущее содержание пути, расходы, связанные с уплатой налогов и страховых платежей; $C_{\text{ут.}}$ — финансовый результат, учитывающий доходы и расходы, образующиеся при утилизации материалов верхнего строения пути.

В качестве продолжительности жизненного цикла (расчетный период) целесообразно принять нормативный период времени между капитальными ремонтами участка железнодорожного пути.

Определение расходов, связанных с капитальным ремонтом участка железнодорожного пути. При выполнении расчета СЖЦ материалов верхнего строения на действующих участках железнодорожного пути затраты на их капитальный ремонт определяются как сумма фактических затрат, связанных с капитальным ремонтом каждого километра пути, входящего в участок.

В случае расчета и проведения анализа СЖЦ рассматриваемых участков железнодорожного пути, которые только планируются к проведению капитального ремонта, используются данные калькуляций стоимости работ, определяемые специализированными проектными организациями.

Определение расходов, связанных с эксплуатацией участка железнодорожного пути. Годовые расходы, связанные с эксплуатацией участка железнодорожного пути, рассчитываются по формуле

$$C_{\text{экспл.}} = Z_{\text{рем.}} + Z_{\text{тек.сод.}} + Z_{\text{налог им.}} + Z_{\text{стр.пл.}} \quad (2)$$

где $Z_{\text{рем.}}$ — расходы, связанные с выполнением промежуточных ремонтов участка железнодорожного пути, руб.; $Z_{\text{тек.сод.}}$ — затраты на текущее содержание участка железнодорожного пути, руб.; $Z_{\text{налог им.}}$ — расходы, связанные с выплатой налога на имущество, руб.; $Z_{\text{стр.пл.}}$ — расходы, связанные с выплатой страховых платежей, руб.

Затраты (расходы) на выполнение промежуточных ремонтов участка железнодорожного пути определяются как сумма затрат на все виды промежуточных ремонтов за ремонтный цикл и рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{рем.}} = \sum_{j=1}^N Z_{\text{рем.},j} n_j / T, \quad (3)$$

где $Z_{\text{рем.},j}$ — затраты на проведение j -го вида ремонта, руб.; n_j — нормативное количество ремонтов j -го вида за межремонтный цикл; T — расчетный период времени (продолжительность жизненного цикла), лет; N — количество видов промежуточных ремонтов.

Количество и виды промежуточных ремонтов определяются для рассматриваемых участков индивидуально, исходя из классификации участка пути и предложенной конструкции верхнего строения пути в соответствии с приказом Минтранса России от 9 февраля 2018 г. № 54 [7].

Затраты на текущее содержание рассматриваемого участка железнодорожного пути складываются из затрат на оплату труда монтеров пути с учетом всех отчислений, стоимости материалов верхнего строения пути, используемых при выполнении работ по текущему содержанию пути:

$$Z_{\text{тек.сод.}} = Z_{\text{опл.тр.}} + Z_{\text{мат.}}, \quad (4)$$

где $Z_{\text{опл.тр.}}$ — затраты на оплату труда монтеров пути, выполняющих работы по текущему содержанию пути, руб.; $Z_{\text{мат.}}$ — стоимость материалов, использованных при выполнении работ по текущему содержанию пути, руб.

Затраты на оплату труда монтеров пути, выполняющих работы по текущему содержанию участка пути, могут быть рассчитаны по формуле

$$Z_{\text{опл.тр.}} = 12 C K_{\text{нач.}} \chi_{\text{тек.сод.}} L, \quad (5)$$

где 12 — число месяцев в году; C — среднемесячная заработная плата монтера пути, руб.; $K_{\text{нач.}}$ — коэффициент, учитывающий начисления общепроизводственных и общехозяйственных расходов к фонду заработной платы для подразделения Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД» и рассчитанный в соответствии с Методическими рекомендациями по расчету расходных ставок для решения внутрикорпоративных экономических задач ОАО «РЖД» и его филиалов, утвержденными распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2020 г. № 3025; $\chi_{\text{тек.сод.}}$ — табличное (нормативное) значение затрат труда на текущее содержание 1 км развернутой длины пути в год, чел.; L — протяженность рассматриваемого участка железнодорожного пути, км.

Нормативная численность работников, которые могут быть привлечены к выполнению работ по текущему содержанию железнодорожного пути, определяется в соответствии с [8].

В стоимость материалов входят затраты на новые материалы и отремонтированные элементы верхнего строения пути, используемые при одиночной смене,

а также затраты на пополнение и замену балласта. Расходы по одиночной смене материалов верхнего строения пути исчисляются по нормам, установленным на 1 км развернутой длины главного и станционного путей, и действующим ценам. При определении потребности в материалах из развернутой длины пути исключают те участки, на которых в планируемом году предусматриваются работы по среднему и подъемному ремонту, а также предусмотрена сплошная замена рельсов новыми и старогодными.

Затраты на материалы при одиночной смене материалов верхнего строения рассматриваемого участка пути рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{мат.}} = L \sum_{t=1}^N m_t e_t, \quad (6)$$

где m_t — норма расхода t -го материала на текущее содержание 1 км пути, где $t = \{\text{рельсы, скрепления, шпалы, балласт}\}$; e_t — стоимость единицы t -го материала верхнего строения пути.

Затраты на материалы при одиночной смене материалов верхнего строения рассматриваемого участка пути рассчитываются на протяжении всего жизненного цикла с шагом 1 год.

Расчет расходов по оплате налога на имущество производится на основании распоряжения ОАО «РЖД» от 13 марта 2017 г. № 395 «Об утверждении Указателя инвентарных объектов основных средств ОАО «РЖД» (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 30 ноября 2017 г. № 2468р) для VIII группы со сроком полезного использования 300 месяцев.

Ставка налога на имущество ОАО «РЖД» определяется законами Российской Федерации.

Согласно ст. 385.3 НК РФ в отношении железнодорожных путей общего пользования и сооружений, являющихся их неотъемлемой технологической частью, соответствующих требованиям, установленным Правительством Российской Федерации, впервые принятых на учет в качестве объектов основных средств начиная с 1 января 2017 г., сумма налога исчисляется с применением коэффициента $K_{\text{зд}}$, значение которого определяется в соответствии с п. 2 ст. 385.3 НК РФ.

Ежегодный налог на имущество определяется умножением ставки налога на среднегодовую стоимость материалов верхнего строения пути:

$$Z_{\text{налог им.}} = C_{\text{ср.}} \text{СН}, \quad (7)$$

где $C_{\text{ср.}}$ — среднегодовая стоимость материалов верхнего строения участка пути, руб.; СН — ставка налога на имущество хозяйства пути ОАО «РЖД».

Размер страховых платежей определяется умножением остаточной стоимости имущества на величину установленного страхового тарифа:

$$Z_{\text{стр.пл.}} = C_{\text{ср.ост.}} \beta, \quad (8)$$

где $C_{\text{ср.ост.}}$ — среднегодовая остаточная стоимость материалов верхнего строения рассматриваемого участка железнодорожного пути, руб.; β — тариф по страхованию имущества путевого хозяйства.

Размер страховых платежей рассчитывается на протяжении всего жизненного цикла с шагом 1 год.

Определение финансового результата от утилизации рельсошпальной решетки, снимаемой при капитальном ремонте участка железнодорожного пути. Рельсошпальная решетка и материалы верхнего строения пути, изымаемые при капитальном ремонте, в зависимости от технического состояния используются как материалы повторного использования или металлолом.

Финансовый результат от утилизации материалов верхнего строения пути рассчитывается исходя из протяженности участка, эпюры шпал, веса рельса, веса металлических частей промежуточных креплений, стоимости заготовки 1 т металлолома, цены реализации 1 т металлолома.

При расчете финансового результата на завершающем этапе жизненного цикла необходимо учитывать то, что часть рельсошпальной решетки (γ) повторно используется для укладки в путь более низкого класса, а часть рельсошпальной решетки $(1-\gamma)$ разбирается и утилизируется.

Финансовый результат от утилизации рельсошпальной решетки участка железнодорожного пути рассчитывается по формуле

$$C_{\text{ут.РШР}} = Z_{\text{повт.исп.РШР}} + Z_{\text{ут.РШР}}, \quad (9)$$

где $Z_{\text{повт.исп.РШР}}$ — стоимость материалов верхнего строения пути в составе рельсошпальной решетки, повторно укладываемой в путь более низкого класса, руб.; $Z_{\text{ут.РШР}}$ — финансовый результат от утилизации материалов верхнего строения пути, входящих в состав рельсошпальной решетки, направляемой на утилизацию, руб.

Стоимость материалов верхнего строения пути, пригодных для повторного использования в составе рельсошпальной решетки, укладываемой в путь более низкого класса, рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{повт.исп.РШР}} = \gamma \left\{ \left[(2L 1000g) / 1000 \right] \times \right. \\ \left. \times \Pi_{\text{нов.р}} K_{\text{гп}} + 2L \Delta \Pi_{\text{нов.с}} K_{\text{гс}} + L \Delta \Pi_{\text{нов.ш}} K_{\text{гш}} \right\}, \quad (10)$$

где 2 — количество рельсовых плетей; 1000 — коэффициент перевода километров в метры, килограммов в тонны; g — вес 1 пог.м рельса, кг; $\Pi_{\text{нов.р}}$ — цена 1 т нового рельса, руб.; $K_{\text{гп}}$ — корректировочный коэффициент годности для старогодных рельсов; Δ — эпюра шпал, количество шпал на 1 км пути; $\Pi_{\text{нов.с}}$ — цена

нового крепления, руб.; $K_{\text{гс}}$ — корректировочный коэффициент годности креплений; $\Pi_{\text{нов.ш}}$ — цена новой шпалы, руб.; $K_{\text{гш}}$ — корректировочный коэффициент годности шпал.

Финансовый результат от утилизации материалов верхнего строения пути, входящих в состав рельсошпальной решетки, направляемой на утилизацию, складывается из затрат на разборку рельсошпальной решетки, доходов от утилизации металлических элементов материалов верхнего строения пути, затрат на утилизацию шпал и рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{ут.РШР}} = Z_{\text{ут.мет.}} - (Z_{\text{разб.РШР}} + Z_{\text{ут.ш}}), \quad (11)$$

где $Z_{\text{ут.мет.}}$ — доходы от утилизации металлических элементов материалов верхнего строения пути, руб.; $Z_{\text{разб.РШР}}$ — затраты на разборку рельсошпальной решетки, руб.; $Z_{\text{ут.ш}}$ — затраты на утилизацию шпал, руб.

Доходы от утилизации металлических элементов материалов верхнего строения пути формируются исходя из протяженности участка, эпюры шпал, веса рельса, веса металлических частей промежуточных креплений, стоимости заготовки 1 т металлолома, цены реализации 1 т металлолома и рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{ут.мет.}} = (1-\gamma) \left[\left((2L 1000g + L \Delta 2g_c) / \right. \right. \\ \left. \left. / 1000 \right) (\Pi_{\text{л}} - \Pi_{\text{з}}) \right], \quad (12)$$

где $\Pi_{\text{л}}$ — цена реализации 1 т лома, руб.; $\Pi_{\text{з}}$ — стоимость заготовки 1 т лома, руб.

Затраты на разборку рельсошпальной решетки определяются по формуле

$$Z_{\text{разб.РШР}} = (1-\gamma) L \Pi_{\text{разб.РШР}}, \quad (13)$$

где $\Pi_{\text{разб.РШР}}$ — цена разборки 1 км рельсошпальной решетки, руб.

Затраты на утилизацию шпал рельсошпальной решетки рассчитываются умножением количества перерабатываемых шпал на затраты по утилизации одной шпалы и определяются по формуле

$$Z_{\text{ут.ш}} = (1-\gamma) L \Delta \Pi_{\text{ут.ш}}, \quad (14)$$

где $\Pi_{\text{ут.ш}}$ — стоимость утилизации шпалы, руб.

Оценка эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения пути. Разработанные методические подходы оценки СЖЦ могут быть использованы для выбора наиболее эффективной конструкции верхнего строения пути на заданном участке железнодорожного пути для заданных условий эксплуатации.

Поскольку СЖЦ рассчитывается за определенный временной период, то должны учитываться различные аспекты фактора времени [5]:

- несопоставимость во времени одних и тех же затрат;
- инфляция;
- неопределенность и риск.

Учет фактора времени производится приведением стоимостных показателей к ценности начального периода путем дисконтирования рассматриваемых экономических показателей.

Дисконтирование осуществляется посредством введения в расчеты коэффициента дисконтирования.

С учетом дисконтирования формула для расчета СЖЦ приобретает вид

$$\text{СЖЦ} = C_{\text{кап.рем.}} + \sum_{i=1}^T [3_{\text{рем.}} + 3_{\text{тек.код.}} + 3_{\text{налог им.}} + 3_{\text{стр.пл.}} + (3_{\text{повт.исп.РШР}} + 3_{\text{ут.РШР}})] \alpha_i, \quad (15)$$

где α_i — коэффициент дисконтирования, который определяется по формуле

$$\alpha_i = (1 + E)^{-i} = \frac{1}{(1 + E)^i}, \quad (16)$$

где i — шаг расчетного периода, год ($i \in [1, T]$); E — ставка дисконтирования.

При оценке альтернативных вариантов конструкций верхнего строения участка пути в качестве критерия используется показатель удельных затрат ($C_{\text{уд.к}}$) на 1 т-км брутто, образующихся за весь период жизненного цикла, которые определяются по формуле

$$C_{\text{уд.к}} = \text{СЖЦ}_k / (T_{\text{норм.к}} L), \quad (17)$$

где $T_{\text{норм.к}}$ — нормативная периодичность выполнения капитального ремонта пути для k -го варианта конструкции пути, млн т брутто.

Наиболее эффективным вариантом конструкции верхнего строения пути признается вариант, имеющий наименьшее значение удельных затрат на 1 т-км брутто, образующихся за весь жизненный цикл функционирования участка железнодорожного пути.

Сводные данные о стоимости этапов жизненного цикла рассматриваемых участков железнодорожного пути с учетом дисконтирования (тыс. руб., цены II квартала 2021 г.)
Summary data of the life cycle stages cost of the selected railway track sections, considering discounting (thousand rubles, prices of the second quarter of 2021)

№ п/п	Наименование затрат	Участок 1 ЖБР-65ПШМ	Участок 2 ЖБР-65Ш	Участок 3 АРС-4	Участок 4 W-30
1	2	3	4	5	6
1	I. Этап приобретения (расходы на капитальные ремонты различных уровней) В том числе:	347 180	350 012	330 262	341 951
	1) капитальный ремонт 12 км 1 уровня (КРН)	291 038	293 660	274 059	285 798
	2) капитальный ремонт 12 км 3 уровня (РС)	56 142	56 352	56 203	56 153
2	II. Этап эксплуатации (расходы на эксплуатацию) В том числе:	88 367	88 567	87 389	86 848
	1) заработная плата	6 535	5 756	5 009	5 756
	2) материалы	6 516	7 004	7 370	5 886
	3) средний ремонт	29 862	30 118	29 936	29 875
	4) планово-предупредительный ремонт пути	14 854	14 854	14 854	14 854
	5) шлифование	14 255	14 255	14 255	14 255
	6) подъемочный ремонт	9 294	9 462	9 349	9 306
	7) страхование имущества	263	265	247	258
	8) налог на имущество	6 788	6 853	6 369	6 659
3	III. Этап утилизации (расходы за жизненный цикл)	–18 907	–19 046	–17 915	–18 311
4	СЖЦ (всего затрат, п. 1 + п. 2 + п. 3)	416 640	419 533	399 736	410 488
5	Продолжительность жизненного цикла в годах (T)	12,73	12,73	12,73	12,73
6	Удельные затраты СЖЦ ($C_{\text{уд.к}}$) на 1 т-км брутто	24,80	24,97	23,79	24,43

По разработанным методическим подходам была выполнена тестовая сравнительная оценка эффективности использования рельсовых креплений ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65Ш, АРС-4, Фоссло W-30 на условном 12-километровом участке железнодорожного бесстыкового пути с рельсами ДТ350, грузонапряженностью 80 млн т·км брутто/км в год, средневзвешенной скоростью движения поездов 100 км/ч, средней осевой нагрузкой 17,05 тс/ось, уклонами подъема и спуска на участке 15 %, количеством поездов в сутки — 45, продолжительностью зимы — 5 месяцев, классом пути — П1.

Ремонтная схема для данного класса пути: КРН—В—С—В—РС—В—П—КРН [7], где КРН — капитальный ремонт 1 уровня (капитальный ремонт железнодорожного пути с использованием новых материалов); В — планово-предупредительная выправка пути; С — средний ремонт железнодорожного пути; РС — капитальный ремонт 3 уровня (сплошная замена рельсов в период между капитальными ремонтами, сопровождаемая работами в объемах среднего ремонта железнодорожного пути); П — подъемочный ремонт железнодорожного пути.

В расчетах принято, что шлифование проводится регулярно через 70 млн т брутто пропущенного тоннажа.

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что в заданных условиях эксплуатации наиболее эффективным является использование в конструкции верхнего строения пути креплений АРС-4 (п. 6 стб. 5 таблицы). Конструкция с данным типом креплений имеет наименьшую величину удельных затрат на 1 т·км брутто — 23,79 тыс. руб.

Заключение. Разработанные методические подходы могут быть использованы для оценки и сравнения эффективности различных проектов применения современных конструкций верхнего строения пути, в которых реализованы одинаковые требования по обеспечению функционирования объекта в заданных условиях, а именно:

- для обоснования выбора типов рельсов, креплений для различных климатических и эксплуатационных условий работы бесстыкового пути;
- для принятия решений о выборе оптимальных конструкций верхнего строения пути для реализации при проектировании и выполнении капитальных ремонтов пути 1 уровня;
- для альтернативных вариантов конструкций верхнего строения пути при строительстве, модернизации и приобретении объектов инфраструктуры;
- для идентификации и выявления факторов, влияющих на увеличение стоимости жизненного цикла железнодорожного пути;

- для оценки и сравнительного анализа различных способов замены, продления срока службы или утилизации выработавших срок службы материалов верхнего строения пути.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Методика расчета стоимости жизненного цикла 1 км железнодорожного пути с различными типами креплений в зависимости от условий эксплуатации [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28 декабря 2018 г. № 2843/р. Доступ из АСПИЖТ.
2. Техничко-экономическое обоснование по применению различных конструкций креплений [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2018 г. № 2848/р. Доступ из АСПИЖТ.
3. Бельтюков В.П., Третьяков А.А. Использование стоимости жизненного цикла для оптимизации технического обслуживания верхнего строения пути // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2015. Вып. 3. С. 42–47.
4. Бельтюков В.П., Андреев А.В. Особенности определения стоимости жизненного цикла верхнего строения пути на участках с разными условиями эксплуатации // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2016. Вып. 3. С. 314–320.
5. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения) [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 г. № 2459р. URL: <https://jd-doc.ru/2007/dekabr-2007/12704-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-27-12-2007-n-2459r> (дата обращения: 20.06.2021).
6. СТО РЖД 02.037—2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРПАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22 марта 2012 г. № 560р. URL: http://oac.rgotups.ru/misc/files/prof_risk/sto_rzd_.pdf (дата обращения: 20.06.2021).
7. О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденных приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286 [Электронный ресурс]: приказ Минтранса России от 9 февраля 2018 г. № 54. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805030055> (дата обращения: 20.06.2021).
8. Нормативы численности работников, занятых на текущем содержании железнодорожного пути [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО РЖД от 26 декабря 2016 г. № 2667р. Доступ из АСПИЖТ.

REFERENCES

1. Metodika rascheta stoimosti zhiznennogo tsikla 1 km zheleznodorozhnogo puti s razlichnymi tipami skrepleniy v zavisimosti ot usloviy ekspluatatsii [Methodology for calculating the cost of the life cycle of 1 km of railway track with different types of fastenings depending on the operating conditions]: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28 dekabrya 2018 g. № 2843/r. [approved by Order of JSC Russian Railways dated December 28, 2018 No. 2843/r]. (In Russ.).
2. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie po primeneniyu razlichnykh konstruktсий skrepleniy [Feasibility study on the use of various designs of fasteners]: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 29 dekabrya 2018 g. № 2848/r. [approved by Decree of JSC Russian Railways dated December 29, 2018 No. 2848/r]. (In Russ.).

3. Bel'tyukov V. P., Tret'yakov A. A. Ispol'zovanie stoimosti zhiznennogo tsikla dlya optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya verkhnego stroeniya puti [Use of the life cycle cost for optimizing the maintenance of track superstructure]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016;3: 42–47. (In Russ.).

4. Bel'tyukov V. P., Andreev A. V. Osobennosti opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya puti na uchastkakh s raznymi usloviyami ekspluatatsii [Features of determining the cost of the life cycle of the upper structure of the track in areas with different operating conditions]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2016;3:314–320. (In Russ.).

5. Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta (osnovnye polozeniya) [Methodology for determining the cost of the life cycle and the limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport (Main provisions)]: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 27 dekabrya 2007 g. № 2459r [approved by Order of JSC Russian Railways dated December 27, 2007 No. 2459r]. URL: <https://jd-doc.ru/2007/dekabr-2007/12704-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-27-12-2007-n-2459r> (access date: 20.06.2021). (In Russ.).

6. STO RZhD 02.037–2011. Upravlenie resursami, riskami i nadezhnost'yu na etapakh zhiznennogo tsikla (URRAN). Upravlenie stoimost'yu zhiznennogo tsikla sistem, ustroystv i oborudovaniya khozyaystv OAO "RZhD" [Management of resources, risks and reliability at the stages of the life cycle (URRAN). Management of the life cycle cost of systems, devices and equipment of JSC Russian Railways]: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 22 marta 2012 g. № 560r [approved by Order of JSC Russian Railways dated March 22, 2012 No. 560r]. URL: http://oac.rgoutps.ru/misc/files/prof_risk/sto_rzd.pdf (access date: 20.06.2021). (In Russ.).

7. O vnesenii izmeneniy v Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii, utverzhdenykh prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286 [On amendments to the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation, approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December 21, 2010 No. 286]: prikaz Mintransa Rossii ot 9 fevralya 2018 g. № 54 [Order of the Ministry of Transport of Russia of February 9, 2018 No. 54]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805030055> (access date: 20.06.2021). (In Russ.).

8. Normativy chislennosti rabotnikov, zanyatykh na tekushchem soderzhanii zheleznodorozhnogo puti [Standards for the number of employees employed on the current maintenance of the railway track]: utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 26 dekabrya 2016 g. № 2667r [approved by Order of JSC Russian Railways dated December 26, 2016 No. 2667r]. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Елена Николаевна ЕФИМОВА,

канд. экон. наук, директор научного центра «Экономика комплексных проектов и тарифообразование», АО «ВНИИЖТ», SPIN-код: 7176-0100, AuthorID: 699691, <https://orcid.org/0000-0002-2395-6185>

Николай Павлович ВИНОГОРОВ (1939–2021),

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс», АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0002-2344-5681>

Алла Ашотовна ШИЛАДЖАН,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный

центр «Рельсы, сварка, транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0003-2716-8172>

Владимир Михайлович КОШЕЛЕВ,

канд. техн. наук, бизнес-аналитик, научный центр «Экономика комплексных проектов и тарифообразование», АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0002-2469-9683>

Дмитрий Андреевич ВАЛОВ,

бизнес-аналитик, научный центр «Экономика комплексных проектов и тарифообразование», АО «ВНИИЖТ», <https://orcid.org/0000-0003-0632-6821>

Наталья Владимировна КУЗНЕЦОВА,

старший преподаватель, кафедра «Транспортное строительство», ФGAOU BO «PYT» (MIIT), SPIN-код: 6276-9288, AuthorID: 1115600, <https://orcid.org/0000-0002-2755-4789>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena N. EFIMOVA,

Cand. of Sci. (Economics), Director of the Research Center "Economics of Complex Projects and Tariff Setting", JSC "VNIIZhT", SPIN-code: 7176-0100, AuthorID: 699691, <https://orcid.org/0000-0002-2395-6185>

Nikolay P. VINOOROV (1939–2021),

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Center "Track Infrastructure and Issues of Wheel—Rail Interaction", JSC "VNIIZhT", <https://orcid.org/0000-0002-2344-5681>

Alla A. SHILADZHYAN,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Research Center "Rails, Welding, Transport Materials Science", JSC "VNIIZhT", <https://orcid.org/0000-0003-2716-8172>

Vladimir M. KOSHELEV,

Cand. of Sci. (Engineering), Business Analyst, Research Center "Economics of Complex Projects and Tariff Setting", JSC "VNIIZhT", <https://orcid.org/0000-0002-2469-9683>

Dmitriy A. VALOV,

Business Analyst, Research Center "Economics of Complex Projects and Tariff Setting", JSC "VNIIZhT", <https://orcid.org/0000-0003-0632-6821>

Natal'ya V. KUZNETSOVA,

Senior Lecturer, Department of Transport Construction, FGAOU VO "RUT" (MIIT), SPIN-code: 6276-9288, AuthorID: 1115600, <https://orcid.org/0000-0002-2755-4789>

ВКЛАД АВТОРОВ

Елена Николаевна ЕФИМОВА. Оценка правомочности и ответственности изложенных подходов требованиям нормативных документов ОАО «РЖД» в части расчета эффективности инвестиционных проектов. Разработка методологии расчета финансового результата утилизации материалов верхнего строения пути. Разработка выводов и предложений (10%).

Николай Павлович ВИНОГОРОВ. Формирование направлений исследований по оценке СЖЦ различных конструкций верхнего строения пути. Представление и анализ исходных данных по стоимости капитального, среднего и подъемочного ремонтов и планово-предупредительной выправки пути в зависимости от конструкции верхнего строения пути (10%).

Алла Ашотовна ШИЛАДЖЯН. Расчет стоимости шлифования поверхности катания рельсов. Анализ существующих в компании подходов к оценке эффективности функционирования конструкций верхнего строения пути с использованием методологии оценки стоимости жизненного цикла (20%).

Владимир Михайлович КОШЕЛЕВ. Разработка методических подходов к оценке эффективности функционирования различных конструкций верхнего строения пути в части, касающейся расходов, связанных с эксплуатацией участка пути и расходом материалов. Формирование выводов и предложений (25%).

Дмитрий Андреевич ВАЛОВ. Выполнение тестовых расчетов по оценке эффективности применения различных конструкций верхнего строения пути в заданных условиях эксплуатации. Разработка методологии оценки стоимости налоговых и страховых платежей. Интерпретация полученных результатов. Разработка предложений по использованию представленных методических подходов (20%).

Наталья Владимировна КУЗНЕЦОВА. Сбор, оценка и представление исходных данных по фактической работоспособности креплений ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65Ш, АРС-4, Фоссло W-30. Расчет расхода материалов на текущее содержание 1 км пути с различными типами креплений. Использование дисконтирования полученных результатов при оценке экономической эффективности различных креплений (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Elena N. EFIMOVA. Evaluation of the eligibility and compliance of the stated approaches with the requirements of the regulatory documents of Russian Railways in terms of calculating the effectiveness of investment projects. Development of a methodology for calculating the financial result of the utilization of the upper structure track materials. Development of conclusions and proposals (10%).

Nikolay P. VINOOROV. Formation of research directions for the evaluation of the life cycle of various structures of the upper structure track. Presentation and analysis of initial data on the cost of major, medium and lifting repairs and scheduled preventive track alignment depending on the upper structure track structure (10%).

Alla A. SHILADZHYAN. Calculation of the cost of grinding the rail tread surface. Analysis of the company's existing approaches to assessing the effectiveness of the functioning of the upper structure track using the life cycle cost assessment methodology (20%).

Vladimir M. KOSHELEV. Development of methodological approaches to assessing the effectiveness of the functioning of various structures of the upper structure track in terms of the costs associated with the operation of the track section and the consumption of materials. Formation of conclusions and proposals (25%).

Dmitriy A. VALOV. Performing test calculations to assess the effectiveness of the use of various structures of the upper structure track in the given operating conditions. Development of a methodology for assessing the cost of tax and insurance payments. Interpretation of the obtained results. Development of proposals for the use of the presented methodological approaches (20%).

Natal'ya V. KUZNETSOVA. Collection, evaluation and presentation of initial data on the actual performance of fasteners ZhBR-65PShM, ZhBR-65Sh, ARS-4, Vossloh W-30. Calculation of the consumption of materials for the current maintenance of 1 km of track with various types of fasteners. The use of discounting of the obtained results in assessing the economic efficiency of various fasteners (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

Статья поступила в редакцию 24.06.2021, первая рецензия получена 06.09.2021, вторая рецензия получена 22.12.2021, принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 24.06.2021, first review received 06.09.2021, second review received 22.12.2021, accepted for publication 17.01.2022.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

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

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

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

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Научный журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные и обзорные статьи, соответствующие тематике журнала. Не допускается направление в редакцию ранее опубликованных статей или статей, отправленных на публикацию в другие журналы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий опубликованная статья будет ретрагирована (отозвана из печати).

При подготовке статьи к публикации в журнале необходимо учитывать следующие требования к ее структуре:

1. Указать УДК (слева в верхнем углу).

2. Заголовок статьи. Должен кратко (не более 12 слов) и информативно отражать содержание статьи. Приводится на русском и английском языках.

3. Инициалы и фамилии авторов, ученая степень, ученое звание, место работы (полное название организации, индекс, страна, город, адрес, e-mail).

4. Аннотация (200–250 слов). Выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В ней должны быть четко обозначены следующие составные части:

- Введение (основная тема, объект и цель исследования).
- Материалы и методы.
- Результаты исследования.
- Обсуждение и заключение (общие выводы, область применения).

5. Ключевые слова (5–8 слов или коротких словосочетаний). Должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

6. Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью; организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основной текст статьи.

8. Список источников (оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008). Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов. Желательно использовать 10–15 источников на русском и английском языках.

9. Информация об авторах должна включать:

- фамилию, имя, отчество (полностью);
- место работы и адрес: индекс, город, улицу, дом;
- должность;
- адрес организации, ведомства (через запятую): индекс, город, улицу, дом;
- электронную почту;
- номер телефона;
- научные идентификаторы авторов (AuthorID, ORCID).

10. Вклад авторов. В конце статьи разъясняется фактический вклад каждого соавтора в выполненную работу.

Техническое оформление

1) Редакция принимает тексты, сохраненные в формате .doc, .docx. Набор текста осуществляется с использованием шрифта Times New Roman, кегль 14 и межстрочный интервал 1,5. Формат листа — А4, поля — 20 мм.

2) Формулы следует набирать в редакторе MS Word Equation Editor или Math Type. Латинские знаки в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом. Формулы нумеруются в круглых скобках.

3) Рисунки могут быть представлены в растровом или векторном формате с разрешением не ниже 300 dpi. Графики, схемы и диаграммы необходимо оформлять в Microsoft Excel.

4) Таблицы должны располагаться в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок.

Важным этапом в процессе отбора статьи является рецензирование. В журнале принято «двойное слепое» (рецензент и автор не знают имен друг друга) рецензирование статей. Рецензент на основании анализа статьи принимает решение о рекомендации ее к публикации (без доработки или с доработкой) или о ее отклонении. В случае несогласия автора статьи с замечаниями рецензента его мотивированное заявление рассматривается редакционной коллегией.

Политика редакционной коллегии журнала поддерживает Кодекс этики научных публикаций, сформулированный Комитетом по этике научных публикаций, и строится с учетом этических норм работы редакторов и издателей. Публикация статей осуществляется на бесплатной основе.

Журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» предоставляет **открытый доступ** к своему контенту, исходя из следующего принципа: свободный открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями. Политика открытого доступа соответствует определению Будапештской инициативы открытого доступа (BOAI).



Научно-образовательное
пространство АО «ВНИИЖТ»

E-SPACE

ПРОГРАММА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПЕРЕПОДГОТОВКИ
«ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА»

Реализуется в дистанционном формате на базе цифровой образовательной платформы 3 KL Русский Moodle

СОЗДАНО НЦ «ЦМПЭ»

e-mail: cmpe@vniizht.ru

tel.: + 7 (499) 260-42-00

Подробная информация: www.vniizht.ru

объем	256 ч	512 ч
время	2 мес.	5 мес.
на выходе	диплом о профпереподготовке	диплом о профпереподготовке с присвоением квалификации
Интерактивные презентации		
Проектная идея		
Спикеры – ведущие ученые, сотрудники АО «ВНИИЖТ»		
Разработки Научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения»		

