

Вестник

Научно-исследовательского
института железнодорожного
транспорта

ISSN 2223-9731

Том 78, №1, 2019



XXII Московский международный Салон «Архимед-2019»



Источник фото: фотобанк ООО «АрхимедЭкспо»

Торжественная церемония открытия выставки: участников и гостей приветствует президент Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед» Д. И. Зезюлин

С 26 по 29 марта 2019 г. на территории КВЦ «Сокольники» проходил XXII Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед-2019».

Форум был организован при поддержке Администрации Президента Российской Федерации, Всемирной организации интеллектуальной собственности и Международной федерации ассоциаций изобретателей. Участниками Салона стали 300 организаций из 35 иностранных государств и 44 регионов Российской Федерации. Более 850 экспонатов было размещено на 4500 кв.м выставочной площади, Салон посетили десятки делегаций российских и зарубежных предприятий и организаций, группы студентов и школьников.

В церемонии торжественного открытия XXII Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2019» принимали участие почетные гости: Е. В. Панина, депутат Государственной Думы; Г. П. Ивлиев, руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности; С. М. Алдошин, вице-президент РАН, академик РАН;

С. Я. Тлевлесова, президент Евразийского патентного ведомства и другие официальные лица.

Основной целью организации и проведения Салона «Архимед» является активизация изобретательской, патентно-лицензионной и инновационной деятельности, развитие рынка результатов интеллектуальной деятельности. На выставке были широко представлены и вызвали большой интерес посетителей экспозиции, посвященные инновациям в области наземного, морского и воздушного транспорта, авиакосмической промышленности, а также информационные, управляющие и навигационные системы.

В рамках деловой программы Салона «Архимед-2019» состоялись Международная научно-практическая конференция «Изобретательская, рационализаторская и патентно-лицензионная деятельность в условиях цифровой экономики», круглые столы, посвященные вопросам изобретательской, патентно-лицензионной деятельности и проблемам инновационного образования в нашей стране.

На стенде АО «ВНИИЖТ» были представлены две перспективные

разработки ученых института – буксовое устройство контроля (БУК), предназначенное для автономного дистанционного контроля в режиме реального времени местоположения подвижного состава (вагонов), технического состояния его отдельных элементов (НИАЦ АО «ВНИИЖТ»), и система автоматизированного управления самоходным специальным железнодорожным подвижным составом (АВ-ССПС), созданная для автоматизированного вождения ССПС – автомотрис, автодрезин, мотовозов (лаб. «Электровозы», отд. «Тяговый подвижной состав», АО «ВНИИЖТ»).

Экспертная комиссия и Международное жюри Салона «Архимед-2019» по достоинству оценили



проекты участников. Они были удостоены золотых, серебряных и бронзовых медалей. Памятный диплом и серебряная медаль за разработку системы АВ-ССПС были вручены авторскому коллективу, в его состав вошли: к.т.н. Р. В. Мурзин, к.т.н. Н. Б. Никифорова, к.т.н. М. В. Художко, к.т.н. И. А. Елисеев, А. В. Стельмашенко, Е. С. Сытов, С. А. Муров.

В марте 2020 г. запланировано проведение XXIII Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед».

Вестник
Научно-исследовательского института
железнодорожного транспорта
Научно-технический журнал
Периодичность: 6 номеров в год
Издается с января 1942 г.
ISSN 2223 – 9731, индекс 70116

Международный редакционный совет
С. А. Виноградов (председатель, канд. техн. наук,
АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
В. Е. Фортон (д-р физ.-мат. наук, проф.,
академик РАН, Москва, Россия),
Б. М. Липидус (д-р экон. наук, проф.,
ОАО «РЖД», Москва, Россия),
К. Эсвелд (проф. железнодорожной
инженерии, Технологический университет
Делфта, Зальтбommel, Нидерланды),
И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф.,
академик РАН, Институт проблем механики
им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия),
С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский
экономический университет, Институт
транспорта и логистики, Вена, Австрия),
Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф.,
член-корреспондент РАН, Институт
машиноведения им. А. А. Благоворова РАН,
Москва, Россия),
В. И. Колесников (д-р техн. наук, проф.,
академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),
В. Ф. Ушкалов (д-р техн. наук, член-
корреспондент НАН, Институт технической
механики НАН, Днепр, Украина),
К. П. Шенфельд (д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ»,
Москва, Россия),
Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук,
Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),
Б. А. Левин (д-р техн. наук, проф., РУТ (МИИТ),
Москва, Россия),
В. И. Сенько (д-р техн. наук, проф.,
Белорусский государственный университет
транспорта, Гомель, Республика Беларусь),
О. Н. Назаров (канд. техн. наук, ОАО «РЖД»,
Москва, Россия),
Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф.,
АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС,
Ростов-на-Дону, Россия),
Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф.,
АО «НИИАС», Москва, Россия),
А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф.,
УрГУПС, Екатеринбург, Россия),
Ли Сюэвей (д-р наук, проф., Пекин,
Китайская Народная Республика)

Редакционная коллегия
А. Б. Косарев (председатель, д-р техн.
наук, проф.),
С. В. Федоров (д-р техн. наук, проф.),
Ж. Е. Бедова (секретарь),
С. М. Захаров (д-р техн. наук, проф.),
Н. Ф. Сирина (д-р техн. наук, доцент),
Д. В. Ермоленко (д-р техн. наук, доцент),
Г. В. Гогричани (д-р техн. наук),
А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),
В. А. Ивницкий (д-р техн. наук, д-р физ.-мат.
наук, проф.),
В. А. Кучумов (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Макарова (д-р экон. наук),
Л. А. Мугинштейн (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),
Б. Э. Плюзберг (д-р техн. наук, проф.),
О. Ф. Мирошниченко (д-р экон. наук, проф.)

Учредитель — АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта».

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ). Статьи
рецензируются.

© «Вестник научно-исследовательского
института железнодорожного транспорта»
(«Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2019

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 78, 1/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1>

СОДЕРЖАНИЕ

Contents	2
Рациональная технология временной отстановки поездов от движения	
Е. А. Сотников, П. С. Холодняк	3–9
Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий в тяговой сети переменного тока	
Ю. И. Жарков, Н. А. Попова, Е. П. Фигурнов	10–18
Результаты комплексных исследований, проведенных ЦНИИ (ВНИИЖТ), и строительных работ МПС (РЖД) по увеличению габаритов грузового и пассажирского подвижного состава на железных дорогах Российской Федерации	
Ю. М. Лазаренко, Д. Н. Аршинцев, О. Н. Назаров, Ю. С. Киреева	19–26
Результаты эксплуатации выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока ВЛ80^Р на Красноярской железной дороге	
С. А. Богинский, В. В. Семченко	27–32
Методология расчета финансового результата для владельца инфраструктуры от повышения провозной способности направления при перевозках в вагонах повышенной грузоподъемности	
О. Ф. Мирошниченко, А. Е. Огинская	33–40
Моделирование движения вагона и расчет износа колес с профилем поверхности катания ВНИЦТТ	
А. М. Орлова, Ю. В. Савушкина, В. И. Федорова	41–47
Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода	
Д. В. Ермоленко, Л. Ю. Юферев, О. А. Рошин	48–53
Оценка средней наработки до отказа поворотных подножек по данным эксплуатации	
М. В. Белоусова, В. В. Булатов	54–58
Разработка смазочного материала для бортовых гребнерельсосмазывателей тягового подвижного состава	
Д. В. Глазунов	59–64

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.
Мнение редакции может не совпадать
с мнением авторов статей.
Редакция не несет ответственности
за содержание рекламных материалов.
Адрес учредителя, издателя, редакции
журнала «Вестник ВНИИЖТ»:
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел. (499) 260-43-19.
Цена свободная.

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.
Подписано к печати 16.04.2019.
Дата выхода в свет 22.04.2019.
Формат бумаги 60×90 1/8.
Офсетная печать. Усл. печ. л. 8.
Тираж 600 экз. Заказ 0521.

Отпечатано ООО «ИПП «КУНА»,
125167, Москва, Ленинградский пр.,
д. 47, стр. 4.
Тел. (495) 795-02-97.

Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute
Vol. 78, 1/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1>

Contents

Cost-effective technology of temporary setting trains aside from the traffic by E. A. Sotnikov, P. S. Kholodnyak	3–9
Accounting power supply schemes for traction substations in the calculation of short circuits in the AC traction network by Yu. I. Zharkov, N. A. Popova, E. P. Figurnov	10–18
Results of comprehensive studies conducted by the Central Research Institute (VNIIZhT) and construction work of the Ministry of Railways (RZD) to increase the loading gauge of freight and passenger rolling stock on the railways of Russian Federation by Yu. M. Lazarenko, D. N. Arshintsev, O. N. Nazarov, Yu. S. Kireeva	19–26
Operation results of reversible converters of AC electric locomotives VL80^R on the Krasnoyarskaya Railway by S. A. Boginskiy, V. V. Semchenko	27–32
Methodology for calculating financial result for the owner of the infrastructure from increasing carrying capacity of the direction during operation in cars with increased capacity by O. F. Miroshnichenko, A. E. Oginskaya	33–40
Modelling car motion and the calculation of the wear of wheels with the VNITsTT rolling surface profile by A. M. Orlova, Yu. V. Savushkina, V. I. Fedorova	41–47
Test results of the resonant single-wire power transmission system for induction heating of the switch rail by D. V. Ermolenko, L. Yu. Yuferev, O. A. Roshchin	48–53
Estimation of the average time to failure of the turning steps according to the operation data by M. V. Belousova, V. V. Bulatov	54–58
Development of the lubricant for side-mounted rail flange lubricators for traction rolling stock by D. V. Glazunov	59–64

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey V. Fedorov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey M. Zakharov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Nina F. Sirina
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),
Dmitriy V. Ermolenko
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),

Georgiy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Victor A. Ivnitskiy
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),

Elena A. Makarova
(Dr. Sci. (Econ.)),
Lev A. Muginshtein
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Evgeniy A. Shur
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Boris E. Glyuzberg
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Olga F. Miroshnichenko
(Dr. Sci. (Econ.), Prof.)

Scientific Editors — L. A. German (Dr. Sci. (Eng.), Prof.), Yu. S. Romen (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova
E-mail: journal@vniizht.ru.

Passed for printing 16.04.2019.
Format 60×90 1/8. Circulation 600 copies.

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319.
Print: JSC “IPP “KUNA”.
info@paradiz.ru.

Vestnik VNIIZhT
is published six times per year
First published in 1942
ISSN 2223 – 9731

A peer reviewed scientific and technological journal
Languages: Russian, English

Publisher:
JSC Railway Research Institute (JSC “VNIIZhT”),
Moscow, Russian Federation
www.vniizht.ru

International Advisory Board:
Sergey A. Vinogradov,
Cand. Sci. (Eng.), Acting General Director of JSC “VNIIZhT”,
Moscow, Russian Federation
Vladimir E. Fortov,
Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the
Russian Academy of Sciences (RAS), Director of United High
Temperature Institute of RAS, Moscow, Russian Federation
Boris M. Lapidus,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of Joint Scientific
Council RZD, Chairman of International Board on Railway
Research (IRRB) of UIC, Guest professor of Stockholm
School of Economics, Moscow, Russian Federation
Coenraad Esveld,
Prof., Dr. of railway engineering of Delft Technical
University, General Director of “Esveld Consulting
Services”, Zaltbommel, Netherlands
Irina G. Goryacheva,
Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of
the RAS, Head of laboratory for tribology, Institute for
Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, Russian
Federation
Sebastian Kummer,
Univ. Prof. Dr. (Econ.) of Vienna University of Economics
and Business, Head of Institute of Transport and Logistics,
Vienna, Austria
Nikolay A. Makhutov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the
RAS, Head of the scientific school “Safety and security
of critically and strategically important objects of
infrastructure” of Research Institute for Machine Science
named after A. A. Blagonravov of the RAS (IMASH RAS),
Moscow, Russian Federation
Vladimir I. Kolesnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Rostov state university of railway
engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian Federation
Victor F. Ushkalov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, corresponding member of the
National Academy of Science of Ukraine, division head of
Statistics for kinetics of material system of the Institute of
Technical Mechanics, Dnepr, Ukraine
Konstantin P. Shenfeld,
Dr. Sci. (Eng.), Executive director of JSC “VNIIZhT”,
Moscow, Russian Federation
Herman S. Fox-Rabinovich,
Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada
Boris A. Levin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of the Russian University
of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russian Federation
Li Xuewei,
Dr. Sci., Professor, Vice-President of Engineering Union
of China Transport system, Party Member of CPC group
of Ministry of Education (Peking University, China)
Benjamin I. Senco,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belorussian State University
of Transport, Gomel, Republic of Belarus
Oleg N. Nazarov,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of technical policy department
JSC RZD, Moscow, Russian Federation
Dmitriy A. Macheret,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, JSC “VNIIZhT”, Joint Research
Council of JSC RZD, Moscow, Russian Federation
Boris E. Dydkin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of
International association of transport universities of
Asian-Pacific countries (IATU APC), Rostov state university
of railway engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian
Federation
Efim N. Rozenberg,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, First deputy Director General
of JSC Design & Research Institute for Information
Technology, Signaling and Telecommunication on Railway
Transport (JSC NIITAC), Moscow, Russian Federation
Alexander V. Smolyaninov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of department “Wagons” of Ural
State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russian Federation

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2019

Рациональная технология временной отстановки поездов от движения

Е. А. СОТНИКОВ, П. С. ХОЛОДНЯК

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Установлены основные факторы необходимости в современных условиях выполнения операции временной отстановки поездов от движения, которые требуют рассмотрения данной операции не в качестве чрезвычайной вынужденной меры вследствие ошибок оперативного персонала, а в качестве одного из элементов технологии перевозочного процесса, требующего его рациональной организации. Такими факторами являются: образование крупных выгрузочных районов в морских портах с учетом периодически возникающих затруднений в их работе, отказы технических средств и нарушения безопасности движения, посуточная неравномерность поездной работы и др. Рассмотрены принципы построения рациональной стратегии временной отстановки поездов от движения. Они предусматривают: использование возможностей инфраструктуры полигонов в целом для отстановки поездов от движения, недопустимость в результате отстановки поездов от движения снижения пропускной способности предыдущих участков перед затрудненным участком ниже его пропускной способности, выбор станций отстановки поездов от движения на основе технико-экономических оценок.

Использование рациональной стратегии временной отстановки поездов от движения при затруднениях в эксплуатационной работе позволит минимизировать расходы ОАО «РЖД», связанные с необходимостью выполнения данного элемента технологии перевозочного процесса.

Ключевые слова: пропускная способность; затруднения в эксплуатационной работе; отстановка поездов; технико-экономическая оценка

Отстановка поездов от движения — элемент технологии перевозочного процесса. Временная отстановка поездов от движения в современных условиях стала одним из элементов технологии перевозочного процесса. Такое положение является следствием действия следующих основных факторов:

1. В последнее десятилетие образовались крупные выгрузочные районы в местах расположения морских портов Дальнего Востока, Северо-Запада и Юга России, где объем выгрузки составляет до 25 % от сетевой и более [1, 2]. В результате на направлениях следования грузов в порты образуются значительные поездопотоки с размерами движения, близкими к наличной пропускной способности участков. При отсутствии специального резерва путевого развития на станциях, обслуживающих морские порты, любое отклонение от нормальной работы по выгрузке оказывает прямое действие на поездную работу прилегающих

направлений. Между тем имеется много причин технологических отклонений в работе крупных выгрузочных районов: несвоевременный подход судов под погрузку; прекращение работы кранов и погрузочно-выгрузочных операций из-за погодных условий; конъюнктурные, в том числе и на мировом уровне, воздействия на условия продажи товаров и, соответственно, продвижения грузов в вагонах; нечеткое взаимодействие всего комплекса структур, связанных с перевозочным процессом в портах; отказы технических средств и др.

Быстрая реакция на режим подвода груженых вагонов к портам под выгрузку даже при установленном снижении их выгрузочной способности не всегда возможна, поскольку из-за большой дальности перевозок (времени доставки грузов) на российских железных дорогах действие большинства упомянутых выше причин начинается, когда погруженные ранее вагоны уже находятся в пути следования и, по существу, являются потенциальными кандидатами на их отстановку от движения еще на подходах к выгрузочному району.

Поэтому после момента возникновения затруднений в работе выгрузочного района в движении на маршрутах к нему, как правило, имеются вагоны и поезда, которые надо отставлять от движения на путях станций ОАО «РЖД» [3], так как выгрузочный район не может их принять.

2. Действующими нормативными документами [4] специально предусматривается использование инфраструктуры ОАО «РЖД» для отстановки поездов от движения. Так, для конкретных отправок возможно отставление поезда от движения в пути следования без прерывания процесса перевозки по коду «01» по причинам, зависящим от грузополучателей, владельцев или пользователей путей необщего пользования, а по коду «39» поезд может быть отставлен от движения в соответствии с договором на оказание услуги по размещению подвижного состава на путях общего пользования без прерывания договора перевозки. По коду «01» пени за нарушение сроков доставки не взыскиваются, а по коду «39» ОАО «РЖД» получает доходы за предоставление услуг [5].

■ E-mail: press@vniizht.ru (Е. А. Сотников)

3. Сеть железных дорог работает со значительной посуточной неравномерностью [6, 7]. Например, при среднесуточном за месяц потоке по одному из направлений двухпутного участка 60 грузовых поездов/сут, размах суточного поступления поездов составляет примерно от 50 до 70 поездов/сут. В некоторые периоды при высокой загрузке линий возможно поступление на участки более их пропускной способности. Это вызывает затруднения в эксплуатационной работе и возможную отстановку поездов от движения.

4. В современных условиях подвод порожних вагонов под погрузку осуществляется по заявкам большого количества операторов вагонного парка. Из-за сложности согласования их работы периодически возникают ситуации избыточного образования порожних вагонов на направлениях следования в районы массовой погрузки. Следствием этого является временное отставание от движения порожних вагонов (составов) на путях станций ОАО «РЖД» и, соответственно, затруднения в эксплуатационной работе.

5. Вследствие несогласованности в работе грузоотправителей в некоторые сутки объем подхода груженых вагонов в адрес морского порта может стать выше его выгрузочной способности, и, соответственно, возникнет потребность в отстановке части поездов от движения.

6. Отказы технических средств и нарушения безопасности движения, ежесуточно возникающие на сети железных дорог, имеют разную продолжительность и, соответственно, разное влияние на ход эксплуатационной работы. При небольших отказах устранение их последствий может исчисляться часами. При крупных отказах и нарушениях безопасности движения — сутками и даже большими периодами. При этом временно могут закрываться для движения главные пути на перегонах, станционные пути и отдельные станционные устройства и т. п. Все это вызывает необходимость при крупных отказах и нарушениях безопасности движения в отстановке части поездов от движения.

Таким образом, технологическую операцию «временная отстановка поездов от движения» следует рассматривать не в качестве чрезвычайной вынужденной меры, потребность в которой возникает из-за ошибок оперативного персонала, а в качестве одного из технологических элементов перевозочного процесса, требующего рациональной его организации. В технологических документах ОАО «РЖД» должен определяться порядок действий оперативного персонала (далее — стратегия отстановки поездов от движения), обеспечивающий минимизацию расходов, связанных с собственно отстановкой поездов от движения, а также расходов, вызываемых воздействием дополнительной загрузки инфраструктуры отставленными

поездами на ход перевозочного процесса в целом на полигоне. При этом должно учитываться, что при различных стратегиях отстановки поездов от движения связанные с этим суммарные расходы могут существенно различаться.

Возможны два варианта такой стратегии:

- первый — продвижение поездопотока без использования возможности отстановки части поездов от движения на дальних подходах к затрудненному участку;
- второй (рациональный) — распределение отставляемых поездов по нескольким участкам с использованием для этого возможностей полигона в целом (здесь и далее под полигоном понимается часть сети железных дорог, управляемая из центра управления перевозками полигонного или регионального (дорожного) уровней).

Использование того или иного варианта зависит от числа поездов, которое требуется отставить от движения $n_{отс}$, а также от количества путей на станциях ближайших подходов к затрудненному участку, выделенных в соответствии с технологическим процессом для отстановки поездов от движения $k_{отс}^{бл}$. Условие перехода от первого ко второму варианту может быть представлено в следующем виде:

$$n_{отс} \geq k_{отс}^{бл}. \quad (1)$$

Принципы построения рациональной стратегии. Рассмотрим принципы построения рациональной стратегии на следующем методическом примере.

Имеется полигон А–Д (см. рисунок) с техническими станциями А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, З, И. Главный ход: А–Б–В–Г–Д; параллельный ход: Б–Е–Ж–З–И–Д (показан пунктиром). В данном примере параллельный ход загружен и отсутствует возможность при возникновении затруднений направлять на него часть поездов с главного хода.

В исходном состоянии пропускная способность всех участков N_{nci} соответствует фактическим размерам движения $N_{\phi i}$, причем $N_{nci} = N_{\phi i} = 50$ поездов/сут (рисунок, а). Для наглядности принято, что все технические станции обеспечивают беспрепятственный пропуск поездопотока.

В некоторый момент времени на участке Г–Д возникло затруднение в виде отказа по путевому хозяйству со снижением пропускной способности участка. Например, произошло расстройство пути с уменьшением ходовой скорости поездов, что вызвало снижение пропускной способности участка Г–Д на $\Delta N_{пс}^{ГД} = -4$ поезда/сут. Руководители полигона определили, что действие данного затруднения составит $t_{пс}^{ГД} = 3$ сут. В методическом примере принято, что потребные фактические размеры дви-

жения в этот период сохраняются на прежнем уровне $N_{\phi i} = 50$ поездов/сут. Эксплуатационная ситуация на момент возникновения затруднения представлена на рисунке, б.

Рассмотрим работу полигона при наличии затруднения на участке Г–Д в части возможных вариантов отстоя поездов от движения.

1-й вариант. После возникновения затруднения поезда не отставляются от движения на дальних подходах к затрудненному участку Г–Д, а продолжают продвигаться к нему (четное направление движения на рисунке).

Очевидно, что с увеличением числа отставленных от движения поездов на участках А–Б, Б–В, В–Г, Г–Д их пропускная способность снижается. Пусть в рассматриваемом методическом примере отстановка поездов от движения снижает $N_{\text{пс}}$ на величину $\Delta N_{\text{пс}}$ так, как показано в табл. 1.

К концу первых суток на участке В–Г будет отставлено от движения 4 поезда ($n_{\text{отс}}^{\text{ВГ}} = 4$ поезда) из-за невозможности их пропуска по участку Г–Д.

Соответственно, сниженная пропускная способность участка В–Г для работы во вторые сутки составит (см. табл. 1)

$$N_{\text{пс}}^{\text{ВГ}*} = N_{\text{пс}}^{\text{ВГ}} - \Delta N_{\text{пс}}^{\text{ВГ}} = 50 - 6 = 44 \text{ поезда/сут.}$$

Поездное положение на полигоне А–Д на конец первых суток (начало вторых суток) представлено на рисунке, в. На участке Б–В в течение вторых суток необходимо отставить от движения 6 поездов ($n_{\text{отс}}^{\text{БВ}} = 6$ поездов), соответственно, к концу вторых суток (началу третьих суток) сниженная пропускная способность участка Б–В для работы в третьи сутки составит (см. табл. 1)

$$N_{\text{пс}}^{\text{БВ}*} = N_{\text{пс}}^{\text{БВ}} - \Delta N_{\text{пс}}^{\text{БВ}} = 50 - 10 = 40 \text{ поездов/сут.}$$

Это положение отражено на рисунке, г.

Соответственно, в третьи сутки на участке А–Б требуется отставить от движения $n_{\text{отс}}^{\text{АБ}} = 10$ поездов.

Общее количество отставленных от движения поездов за трие суток равно

$$n_{\text{отс}}^{\text{общ}} = n_{\text{отс}}^{\text{ВГ}} + n_{\text{отс}}^{\text{БВ}} + n_{\text{отс}}^{\text{АБ}} = 4 + 6 + 10 = 20 \text{ поездов.}$$

После восстановления в конце третьих суток пропускной способности участка Г–Д до 50 поездов/сут период подъема отставленных от движения поездов $t_{\text{под}}$ составит

$$t_{\text{под}} = \frac{n_{\text{отс}}^{\text{общ}}}{N_{\text{пс}}^{\text{ГД}} - N_{\text{пс}}^{\text{ГД}*}} = \frac{20}{50 - 46} = 5 \text{ сут.}$$

Количество поездо-суток простоя отставленных от движения поездов определено в табл. 2.

Таблица 1

Снижение пропускной способности участков $N_{\text{пс}}$ при увеличении числа отставленных от движения поездов $n_{\text{отс}}$ в условном примере

Table 1

Reducing capacity of sections $N_{\text{пс}}$ with an increase in the number of trains $n_{\text{отс}}$ set aside from the traffic in the conditional example

$n_{\text{отс}}$ на участке, поездов	$\Delta N_{\text{пс}}$, поездов/сут	$N_{\text{пс}}$ по участкам, поездов/сут	
		Б–В	В–Г
1	–1	49	49
2	–2	48	48
3	–4	46	46
4	–6	44	44
5	–8	42	42
6	–10	40	40

Из данного методического примера хорошо видно, что организация эксплуатационной работы при существенных затруднениях без отстоя поездов от движения на дальних подходах (1-й вариант) характеризуется лавинообразным нарастанием на полигоне вагонного парка с избыточным, по сравнению с возможным, снижением пропускной способности участков и станций, что влечет за собой непроизводительный рост расходов на выполнение перевозочного процесса.

Более предпочтителен 2-й — рациональный вариант стратегии эксплуатационной работы по отставке поездов от движения. Заметим, что в данном случае рассматривается стратегия без применения других мер, кроме отстоя поездов от движения.

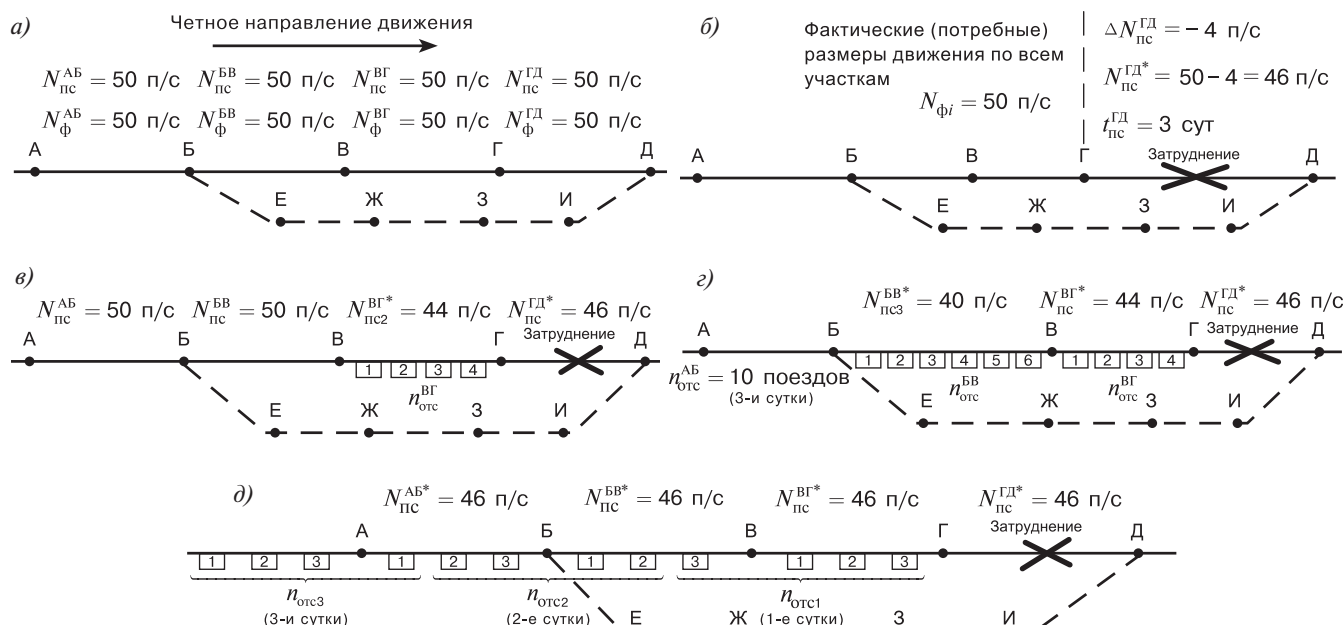
Таблица 2

Определение простоя отставленных от движения поездов, поезд. сут

Table 2

Definition of idle of trains set aside from the traffic, train per day

Конец текущих суток после начала затруднения, сут	Количество отставленных поездов с учетом их подъема
1	4
2	10
3	20
4	16
5	12
6	8
7	4
8	0
Всего	74



1-й и 2-й (рациональный) варианты размещения избыточного количества поездов (составов) на полигоне при затруднениях в эксплуатационной работе:

а — эксплуатационная ситуация на полигоне (исходное состояние, четное направление); б — эксплуатационная ситуация на полигоне на момент начала затруднений в эксплуатационной работе; в — планируемое состояние размещения поездов на полигоне на конец первых суток (начало вторых суток) после возникновения затруднений по 1-му варианту; г — планируемое состояние размещения поездов на полигоне на конец вторых суток (начало третьих суток) и на третий сутки после возникновения затруднений по 1-му варианту; д — отстановка поездов на полигоне А—Д по 2-му варианту. Обозначение п/с — поездов/сут

1st and 2nd (rational) options for placing an excess number of trains (rolling stocks) at the operational area in case of difficulties in operational work:

а — operational situation at the site (initial condition, even direction); б — operational situation at the site at the time of the start of difficulties in the operational work; в — planned state of placing trains at the operational area at the end of the first day (beginning of the second day) after the occurrence of difficulties according to the 1st option; г — planned state of placing trains at the operational area at the end of the second (beginning of the third day) and on the third day after the occurrence of difficulties under the 1st option; д — setting aside trains at the А—Д operational area on the 2nd option. Designation п/с — trains/day

По рациональному варианту отстановка поездов от движения организуется в целом на участках полигона. Надо отметить, что именно рациональное управление эксплуатационной работой по отстановке поездов от движения на полигонах позволяет наиболее правильно размещать возникающие избыточные вагонные парки, что снижает неизбежные дополнительные расходы.

В рассматриваемом методическом примере при организации эксплуатационной работы по отстановке поездов от движения по рациональному варианту используется такая расстановка поездов отставляемых от движения, чтобы значения сниженной пропускной способности участков $N_{\text{пс}}^*$ не снижались менее сниженной пропускной способности затрудненного участка $N_{\text{пс}}^{\text{ГД}*}$ (нарушение этого условия имело место в первом варианте), т. е.

$$N_{\text{пс}}^* \geq N_{\text{пс}}^{\text{ГД}*} \quad (2)$$

или в общем виде

$$N_{\text{пс}}^* \geq N_{\text{пс}}^{\text{затр}*}, \quad (3)$$

где $N_{\text{пс}}^{\text{затр}*}$ — сниженная пропускная способность затрудненного участка.

Согласно табл. 1 это условие соблюдается при $n_{\text{отс}} = 3$ поезда на одном участке. В этом случае $N_{\text{пс}}^{\text{БВ}*} = N_{\text{пс}}^{\text{ВГ}*} = 46$ поездов/сут. При организации эксплуатационной работы по второму — рациональному варианту в первые сутки 3 поезда отставляются от движения на участке В—Г и 1 поезд на участке Б—В. Во вторые сутки по 2 поезда размещаются на участках Б—В и А—Б. В третьи сутки — 1 поезд на участке А—Б, а 3 поезда на подходах к полигону, о чем руководители полигона своевременно запрашивают руководство центра управления перевозками Центральной дирекции управления движением.

Общее количество отставленных от движения поездов составит $4 \cdot 3 = 12$ поездов, т. е. в 1,7 раза меньше, чем по 1-му варианту. Количество поездо-суток (определяется аналогично табл. 2) равно 34, т. е. почти в 2 раза меньше, чем по 1-му варианту.

Очевидно, что в качестве расчетной для полигонов следует принимать рациональную стратегию расстановки на полигоне поездов отставляемых от движения.

Технико-экономическая оценка вариантов отстоя поездов от движения. Техническая операция отстоя поездов от движения требует дополнительных расходов, связанных с:

- одиночным следованием локомотивов от отставленного поезда до ближайшей станции смены локомотивов (эксплуатационного депо) и то же в обратном порядке при подъеме отставленного поезда;
- простоем локомотива (с бригадой) на станции отстоя поезда при его отстое и подъеме;
- возможной выплатой пени за несвоевременную доставку грузов в случае превышения нормативных сроков доставки груза;
- занятием станционного пути;
- маневровой работой с отставленным поездом (например, растаскивание поезда для образования служебных проходов).

В свою очередь, отстой поезда от движения может являться вторичной причиной, вызывающей дополнительную отстой поездов от движения (см. методический пример, 1-й вариант стратегии эксплуатационной работы по отстоя поездов от движения), т. е. когда не удастся по каким-либо причинам реализовать рациональную стратегию эксплуатационной работы по отстоя поездов от движения при возникновении затруднений. Такое положение возникает при следующем условии:

$$N_{\text{пс}} - \Delta N_{\text{пс}} < N_{\text{ф}}, \text{ поездов/сут,} \quad (4)$$

где $N_{\text{ф}}$ — фактические размеры движения; $\Delta N_{\text{пс}}$ — снижение пропускной способности в результате действия затруднения.

То есть увеличение расходов в связи с необходимостью отстоя поездов в данном случае включает две составляющие:

$$\mathcal{E}_{\text{отс}}^{\text{общ}} = \mathcal{E}_{\text{отс}} + \mathcal{E}_{\text{отс}}^{\text{доп}}, \text{ руб.,} \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отс}}^{\text{общ}}$ — общие расходы, связанные с отстоем поездов; $\mathcal{E}_{\text{отс}}$ — расходы, связанные с отстоем поездов вследствие первичного воздействия затруднений; $\mathcal{E}_{\text{отс}}^{\text{доп}}$ — дополнительные расходы, связанные с последующей необходимостью дополнительной отстоя поездов вследствие снижения пропускной и перерабатывающей способности участков и станций после первичной отстоя поездов по условию (4).

Составляющая $\mathcal{E}_{\text{отс}}$ в формуле (5) учитывается всегда, а составляющая $\mathcal{E}_{\text{отс}}^{\text{доп}}$ учитывается в случаях, когда соблюдается неравенство (4).

Минимальные дополнительные расходы, связанные с отстоем на станциях поездов с учетом периода их подъема при действии затруднений $\mathcal{E}_{\text{отс}}$ (рациональный вариант), определяются при выполнении условия

$$\mathcal{E}_{\text{отс}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{отс}}^{\text{затр}}} \mathcal{E}_{\text{отс}i} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отс}i}$ — расходы, связанные с отстоем одного поезда на i -й станции [8]; $n_{\text{отс}}^{\text{затр}}$ — количество станций на которых отставляются поезда.

При этом выбор станций отстоя поездов производится с учетом фактической свободности путей (или возможности их освобождения), выделенных на полигоне для этих целей.

Дополнительные расходы, связанные с отстоем поезда от движения на i -й станции определяются на основе [8, 9, 10, 11]. Дополнительно учитываются имеющие место в оперативной работе расходы, связанные с ожиданием отправления одиночных локомотивов со станции отстоя поездов, временем нахождения локомотива от прибытия на станцию отстоя до отправления с поездом при его подъеме, выполнением технических операций работниками ПТО при подъеме поезда. Дополнительные расходы определяются из следующей зависимости (за период от отстоя до подъема поезда):

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{отс}i} = & \mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{од}} + \mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{ож}} + \mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{пени}} + \mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{путь}} + \\ & + \mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{ман}} + \mathcal{E}_{\text{пкм}}^{\text{имс}}, \text{ руб.,} \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{од}}$ — дополнительные расходы на одиночное следование локомотивов от отставленного поезда до ближайшей станции смены локомотива (эксплуатационного депо) и то же в обратном порядке при подъеме отставленного поезда, руб.; $\mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{ож}}$ — дополнительные расходы, связанные с простоем локомотивов с локомотивной бригадой на станции отстоя в ожидании отправления одиночным следованием (при отстое поезда) и в ожидании отправления с поездом, а также на выполнение технических операций (при подъеме поезда), руб.; $\mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{пени}}$ — дополнительные расходы, связанные с возможной выплатой пени за несвоевременную доставку груза при задержке поезда на станции его отстоя, руб.; $\mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{путь}}$ — дополнительные расходы, связанные с занятием пути отставленным от движения поездом без локомотива, руб.; $\mathcal{E}_{\text{отс}i}^{\text{ман}}$ — дополнительные расходы, связанные с возможным выполнением маневровой работы с отставленным поездом, например по растаскиванию состава для образования служебных проходов, или выработкой из состава вагонов, требующих срочного отправления, руб.; $\mathcal{E}_{\text{пкм}}^{\text{имс}}$ — дополнительные расходы, связанные с дополнительным пробегом поездов при их отстое от движения, руб.

Использование рациональной стратегии временной отстановки поездов от движения при затруднениях в эксплуатационной работе позволит минимизировать расходы ОАО «РЖД», связанные с необходимостью выполнения данного элемента технологии перевозочного процесса.

Выводы. 1. Операцию отстановки поездов от движения в современных условиях следует рассматривать в качестве одного из элементов технологии перевозочного процесса, требующего его рациональной организации.

2. При возникновении затруднений в ходе перевозочного процесса необходимо использовать рациональную стратегию эксплуатационной работы по отстановке поездов от движения, предусматривающую полное использование возможностей станций по размещению отставленных от движения поездов на полигонном (региональном) уровне.

3. Для минимизации расходов, связанных с отстановкой поездов от движения, требуется технико-экономическая оценка возникающих при этом затрат с выбором оптимального варианта по минимуму расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пехтерев Ф. С., Шестаков П. А. Перспективы развития грузовых перевозок // Железнодорожный транспорт. 2014. № 10. С. 15–19.
2. Мишарин А. С. Генеральная схема — основа устойчивого развития железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. 2016. № 5. С. 11–14.
3. Бородин А. Ф., Сотников Е. А. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли частных вагонов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 3. С. 8–19.
4. Порядок определения эффективности формирования и вождения соединенных поездов во всех видах движения на основе критериев экономической целесообразности, состояния и загрузки

ки инфраструктуры, безопасности движения: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28 дек. 2015 г. № 3109р.

5. Об утверждении платы за нахождение на железнодорожных путях общего пользования подвижного состава и правил ее применения (Тарифное руководство) [Электронный ресурс]: утв. приказом Федеральной службы по тарифам от 29 апр. 2015 г. № 127-т/1. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420275319> (дата обращения: 29.09.2018 г.).

6. Шенфельд К. П., Сотников Е. А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: Научный мир, 2015. С. 121–127.

7. Мугинштейн Л. А., Шенфельд К. П. Развитие тяжеловесного движения грузовых поездов. М.: Интекст, 2011. 76 с.

8. Холодняк П. С. Расчет дополнительных расходов на выполнение перевозочного процесса при возникновении затруднений в эксплуатационной работе с учетом потерь пропускной и перерабатывающей способности // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Ч. 1 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричани. М.: РАС, 2019. С. 65–71.

9. Методика экономической оценки размещения на инфраструктуре ОАО «РЖД» грузовых поездов, временно отставленных от движения: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 нояб. 2015 г. № 2682р.

10. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон Российской Федерации от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ. (ред. от 14.06.2012 г. с изм. 01.01.2013 г.). URL: <http://www.zakonpro.ru/zakony/18-fz-ot-2012-06-14-ustav> (дата обращения: 29.09.2018 г.).

11. Расходные ставки, определяемые на основе зависящих от объемов работы расходов ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18 апр. 2018 г. № 778/р.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СОТНИКОВ Евгений Александрович,
д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник,
НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ»

ХОЛОДНЯК Павел Сергеевич,
начальник отдела, НЦ «ЦМПЭ», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 09.10.2018 г., принята к публикации 10.12.2018 г.

Cost-effective technology of temporary setting trains aside from the traffic

E. A. SOTNIKOV, P. S. KHOLODNYAK

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The article determines main factors of the need for modern conditions of temporary setting aside trains from the traffic, which require consideration of this operation not as an emergency forced measure, the need for which arises because of operational personnel errors, but as one of the elements of the transportation process technology that require it rational organization. These factors are: formation of large unloading areas in seaports taking into account recurring difficulties in its work, technical equipment failures and traffic safety violations, daily irregularity of train operation, etc. Principles of building a rational strategy for temporary setting aside trains from traffic are considered. It makes provision for: using the capabilities of the opera-

tional area infrastructure as a whole for set aside trains, impermissibility of reducing the carrying capacity of previous sections of the difficult section below its carrying capacity as a result of set aside trains, selecting stations for set aside trains based on feasibility studies.

Use of a cost-effective strategy for the temporary setting trains from traffic in the event of operational difficulties will minimize the expenses of the JSC "Russian Railways" related to the need to carry out this element of the transportation process technology.

Keywords: traffic capacity; difficulties in operational work; train setting aside; feasibility study

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-3-9>

REFERENCES

1. Pekhterev F.S., Shestakov P.A. *Perspektivy razvitiya gruzovykh perevozok* [Prospects for the development of freight traffic]. Zheleznodorozhnyy transport, 2014, no. 10, pp. 15–19.
2. Misharin A.S. *General'naya skhema — osnova ustoychivogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta* [General scheme — the basis of sustainable development of railway transport]. Zheleznodorozhnyy transport, 2016, no. 5, pp. 11–14.
3. Borodin A.F., Sotnikov E.A. *Ratsional'noe sootnoshenie vmestimosti putey stantsiy i vagonnykh parkov s uchedom uvelicheniya doli privatnykh vagonov* [Cost-effective ratio of tracks capacity of stations and car fleets, taking into account the increase in the share of private cars]. Zheleznodorozhnyy transport, 2011, no. 3, pp. 8–19.
4. *Procedure for determining the efficiency of formation and driving of connected trains in all types of traffic based on the criteria of economic feasibility, condition and infrastructure load, traffic safety*. Approved by the decree of the JSC "RZD" no. 31091r on December 28, 2015. (in Russ.).
5. *On approval of the fee for rolling stock being on the railway tracks of common use and the rules for its application (Tariff Guide)*. Approved by order no. 127-t/1 of the Federal Tariff Service on April 29, 2015. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420275319> (retrieved on 29.09.2018) (in Russ.).
6. Shenfeld K.P., Sotnikov E.A. *Razvitie metodov upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh* [Development of methods for managing transportation process in railway transport in modern conditions]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2015, pp. 121–127.
7. Muginstein L.A., Shenfeld K.P. *Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya gruzovykh poezdov* [The development of heavy haul freight trains]. Moscow, Intext Publ., 2011, 76 p.

■ E-mail: press@vniizht.ru (E. A. Sotnikov)

8. Kholodnyak P.S., Kosarev A.B., Gogrichiani G.V. *Raschet dopolnitel'nykh raskhodov na vypolnenie perevozochnogo protsessa pri vozniknovenii zatrudneniy v ekspluatatsionnoy rabote s uchedom poter' propusknoy i pererabatyvayushchey sposobnosti* [Calculation of additional costs for the implementation of the transportation process in case of difficulties in operational work, taking into account the loss of throughput and processing capacity]. Aktual'nye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. Ch. 1 [Actual issues of railway transport development. Materials of Russian scientific-practical conference to the 75th anniversary of the post-graduate school of the Railway Research Institute. Part 1]. Moscow, RAS Publ., 2019, pp. 65–71.

9. *Methods of the economic assessment of the deployment of freight trains temporarily set aside from traffic on the infrastructure of the JSC "RZD"*. Approved by order of the JSC "RZD" no. 2682r on November 12, 2015 (in Russ.).

10. *Charter of railway transport of the Russian Federation*. Federal Law of the Russian Federation no. 18-FZ on January 10, 2003 (revised June 14, 2012, as amended on January 1, 2013). URL: <http://www.zakonprost.ru/zakony/18-fz-ot-2012-06-14-ustav> (retrieved on 29.09.2018) (in Russ.).

11. *Expenditure rates determined on the basis of expenses of transportation activities dependent on the scope of work of the JSC "RZD"*. Approved by order of the JSC "RZD" no. 778/r on April 18, 2018 (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, SC "CMPE", JSC "VNIIZhT"

Pavel S. KHOLODNYAK,

Head of the Department, SC "CMPE", JSC "VNIIZhT"

Received 09.10.2018

Accepted 10.12.2018

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России: коллективная монография / под ред. А. Б. Косарева, О. Н. Назарова. М.: РАС, 2018. 119 с. (Труды АО «ВНИИЖТ»).

Рассмотрены вопросы научно-технического сопровождения работ, связанных с созданием, испытаниями, вводом в эксплуата-

цию систем инфраструктуры и высокоскоростного подвижного состава отечественных железных дорог.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

Певзнер В. О. Научные основы системы управления состоянием пути. М.: РАС, 2018. 272 с.

Рассмотрены цели и задачи систем управления состоянием пути, организации технического обслуживания пути, методы оценки воздействия подвижного состава на путь и возможности их совершенствования, вопросы работы пути в условиях повышения осевых нагрузок подвижного состава, опыт унификации ширины колеи на «Российских железных дорогах» и оптимизации возвышения наружного рельса в кривых, перспективные направления совершенствования системы оценки состояния пути и его технического обслуживания.

Книга предназначена для работников железных дорог, сотрудников научных и научно-технических организаций, связанных с эксплуатацией и строительством железнодорожного пути; может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам транспортных вузов.

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

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий в тяговой сети переменного тока

Ю. И. ЖАРКОВ, Н. А. ПОПОВА, Е. П. ФИГУРНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

Аннотация. При вычислении токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока предполагается, что каждая из тяговых подстанций получает питание от несвязанных между собой источников внешнего электроснабжения с известными сопротивлениями. В ряде случаев, особенно при питании группы тяговых подстанций от высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения, система внешнего электроснабжения оказывает влияние не только на величину токов короткого замыкания, но и на их перераспределение между смежными тяговыми подстанциями той же подстанционной зоны, где рассматривается это замыкание. Такое неучтенное перераспределение может оказывать негативное влияние на защиту от коротких замыканий.

Рассматриваются схемы замещения тяговой сети с учетом сопротивлений системы внешнего электроснабжения. Обращается особое внимание, что в схемах замещения прямой и обратной последовательности значение приведенного сопротивления одной фазы многообмоточного трансформатора, вычисленное по напряжению короткого замыкания, не зависит от схемы соединения его обмоток. Отмечается, что в ряде случаев полную схему внешней системы электроснабжения получить затруднительно. Учитывая, что короткое замыкание в тяговой сети для системы внешнего электроснабжения является удаленным, предлагается в качестве источников питания рассматривать опорные сетевые или тяговые подстанции, от которых по высоковольтным линиям электропередачи осуществляется питание тяговых подстанций. Сопротивление опорных подстанций как источников питания должно учитывать подключенную эквивалентную энергосистему.

Такое эквивалентирование необходимо осуществлять по известным значениям токов или мощностей короткого замыкания на вводах опорной подстанции либо, если такие сведения отсутствуют, по номинальным значениям отключаемых токов или мощностей выключателей присоединений высоковольтных линий.

Рассматриваются следующие схемы питания тяговых подстанций:

- каждая от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения;
- от двухцепной высоковольтной линии продольного электроснабжения при ее питании от разных опорных подстанций;
- от опорной сетевой подстанции двумя линиями получает питание опорная тяговая подстанция, а от нее двумя линиями по кольцевой схеме получают питание тяговые подстанции.

Эти три общих случая охватывают все наиболее распространенные схемы питания тяговых подстанций. Для каждого из них приведены формулы, позволяющие определить ре-

зультатирующее эквивалентное сопротивление схемы внешнего электроснабжения, которое должно учитываться в схеме замещения тяговой сети.

Ключевые слова: тяговая сеть; короткие замыкания; система внешнего электроснабжения; схемы внешнего питания; схемы замещения; сопротивления; токи

Введение. Традиционная схема питания межподстанционной зоны от тяговой подстанции А до смежной тяговой подстанции В при коротком замыкании тяговой сети (между контактной КС и рельсовой РС сетями) приведена на рис. 1. Она предполагает, что силовые тяговые трансформаторы T_A и T_B получают питание от не связанных между собой систем внешнего электроснабжения соответственно ЭС_А и ЭС_В [1, 2, 3, 4].

Искомой величиной являются линейные токи I_A и I_B , вычисляемые, например, в соответствии с [2, 3, 5]. По этим токам находят токи питающих линий контактной сети, значения которых используются для выбора уставок защиты от коротких замыканий.

В [6] справедливо отмечается, что принятая на рис. 1 схема подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения не является единственной и в целом ряде случаев, например приведенном в [6], не обеспечивает требуемой точности. Питание смежных тяговых подстанций может осуществляться от одной системы внешнего электроснабжения, от одноцепной или двухцепной линии продольного электроснабжения при одностороннем, кольцевом или двустороннем питании и т. п. [1, 7]. Эти обстоятельства в общем случае влияют не только на значения токов I_A и I_B , но и на их соотношения, что может негативно сказаться на обосновании выбора уставок защит от коротких замыканий, рассчитанных не для каждого из реальных случаев подключения тяговой подстанции к системе внешнего электроснабжения, а в предположении, что такое подключение осуществлено по схеме, приведенной на рис. 1.

В статье рассматривается и обосновывается методика составления схем замещения и расчета их параметров, предусматривающая и другие возможные способы присоединения тяговых подстанций к системе

внешнего электроснабжения с учетом реальных условий эксплуатации и проектирования, а также взаимодействия с территориальными сетевыми и (или) иными энергоснабжающими организациями, к электрическим сетям которых эти подстанции подсоединены.

Схемы замещения. Расчет токов короткого замыкания в трехфазных электроустановках напряжением свыше 1 кВ осуществляется на основании схем замещения, правила составления которых приведены в [8] и описаны также в [9, 10, 11]. Согласно [8] для любого короткого замыкания в общем случае требуется составлять три схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательности. Конечный результат получают методом наложения. Схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей следует выполнять в однолинейном (однофазном) исполнении. Никакой погрешности при этом не возникает. Обоснование применимости однофазных схем замещения приведено, например, в [11]. Вместе с тем следует отметить, что найденные для схемы замещения токи являются реальными только для той части схемы, ступень напряжения которой принята в качестве основной. Короткое замыкание в тяговой сети является для электроустановок несимметричным (двухфазным $K^{(2)}$) с обмоткой трансформатора, соединенной треугольником. В этом случае токи нулевой последовательности отсутствуют, а сопротивления прямой и обратной последовательностей учитываемых элементов одинаковы. Поэтому для расчета достаточно составлять только одну схему замещения для прямой последовательности.

В упрощенном виде схема замещения при коротком замыкании на выводах понижающего трансформатора приведена на рис. 2, а. Отличительной особенностью схемы в трехлинейном исполнении является соединение ЭДС, соответствующее прямой последовательности: источники фазных ЭДС соединены звездой. Из рис. 2, а следует [11]:

$$I_K = \frac{|\dot{E}_b - \dot{E}_c| 10^{-3}}{2(X'_C + X_T)} = \frac{\sqrt{3}E 10^{-3}}{2(X'_C + X_T)} = \frac{\sqrt{3}E 10^{-3}}{X_n}, \text{ А}, \quad (1)$$

где E — модуль фазовой ЭДС источника питания ($E = |\dot{E}_a| = |\dot{E}_b| = |\dot{E}_c|$), кВ; X_n — входное сопротивление тяговой подстанции, равное $2(X'_C + X_T)$, Ом.

В соответствии с [8] в формуле (1) учтены только индуктивные сопротивления, поскольку при вычислении токов короткого замыкания в высоковольтных установках значениями активного сопротивления из-за его малости пренебрегают. Это правило не касается сопротивлений тяговой сети.

Знаменатель выражения (1) соответствует так называемому входному сопротивлению X_n тяговой подстанции при двухфазном коротком замыкании, состоящему из удвоенной суммы фазных сопротивлений питающей

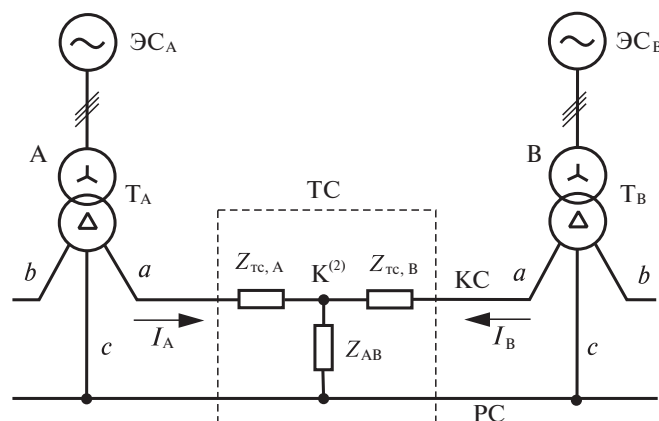


Рис. 1. Расчетная схема питания межподстанционной зоны при коротком замыкании в тяговой сети: ЭСА, ЭСВ — система внешнего электроснабжения тяговых подстанций А и В соответственно; ТА и ТВ — силовые тяговые трансформаторы; КС — контактная сеть; РС — рельсовая сеть; ТС — Т-образная схема замещения тяговой сети многопутного участка при коротком замыкании; $K^{(2)}$ — расчетная точка двухфазного короткого замыкания; $Z_{тс, А}$, $Z_{тс, В}$, $Z_{АВ}$ — эквивалентные комплексные сопротивления схемы замещения тяговой сети многопутного участка

Fig. 1. Calculated power supply scheme of the inter-station zone in case of a short circuit in the traction network: ЭСА, ЭСВ — external power supply system of the traction substations А and В respectively; ТА and ТВ — power traction transformers; КС — catenary; РС — rail network; ТС — T-shaped scheme of replacing traction network of a multi-track section during a short circuit; $K^{(2)}$ — calculated point of a two-phase short circuit; $Z_{тс, А}$, $Z_{тс, В}$, $Z_{АВ}$ — equivalent complex resistances for replacing the traction network of the multi-track section

системы внешнего электроснабжения X_C и трансформатора X_T , рис. 2, а, б. Расчет может выполняться как в относительных, так и в именованных единицах. Как правило, для расчетов токов короткого замыкания в тяговой сети используются именованные единицы, причем все они должны быть приведены к единым базисным условиям. Для элементов цепи системы внешнего электроснабжения и тяговых трансформаторов приведение следует осуществлять по условиям [8]:

$$\dot{E} = E \frac{U_{ср. ном}}{U_{ср. N}}; \dot{X} = X \frac{U_{ср. ном}^2}{U_{ср. N}^2}; \dot{X} = X_{*(ном)} \frac{U_{ср. ном}^2}{S_{ном}}, \quad (2)$$

где E , X — значения фазных ЭДС, кВ, и сопротивлений, Ом, на той ступени напряжения, на которой находится данный элемент; $X_{*(ном)}$ — сопротивление элемента, выраженное в относительных единицах при номинальных условиях; $U_{ср. ном}$ — среднее номинальное линейное напряжение, кВ, сети той ступени напряжения, которая принята за основную (27,5 кВ); $U_{ср. N}$ — среднее номинальное линейное напряжение, кВ, той ступени напряжения, где находится элемент, параметры которого подлежат приведению (для системы внешнего электроснабжения 37, 115, 230 кВ); $S_{ном}$ — номинальная мощность элемента, МВ·А. Кругжок над соответствующей величиной обозначает, что она приведена к базисным значениям.

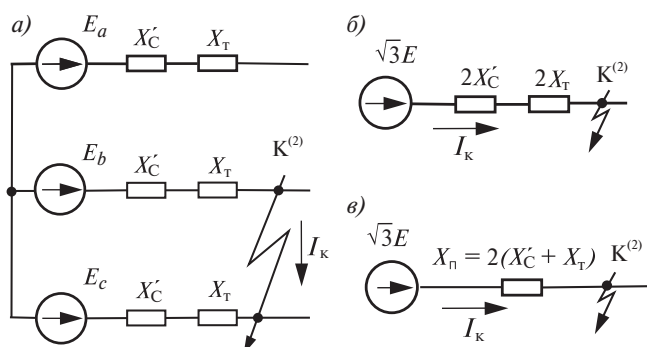


Рис. 2. Трехлинейная (а) и однолинейные (б, в) упрощенные схемы замещения прямой последовательности, при двухфазном коротком замыкании:

E_a, E_b, E_c — фазные ЭДС источников питания;
 X'_C — индуктивное сопротивление фазы системы внешнего электроснабжения, приведенное к базовому напряжению;
 X_T — индуктивное сопротивление фазы понижающего трансформатора, приведенное к базовому напряжению;
 X_n — входное сопротивление тяговой подстанции

Fig. 2. Three-line (a) and single-line (б, в) simplified equivalent sequence replacement schemes with two-phase short circuit:

E_a, E_b, E_c — phase EMF of power sources; X'_C — phase inductive resistance of external power supply system, reduced to the base voltage;
 X_T — phase inductive resistance of the step-down transformer, reduced to the base voltage; X_n — input resistance of traction substation

К сожалению, в ряде публикаций такие требования соблюдены не в полной мере, что и приводит к расхождениям при составлении схем замещения и в результатах расчетов, о которых отмечено в [5].

В связи с многочисленной неопределенностью в исходных данных и условиях, при которых возникает короткое замыкание, схема замещения составляется и рассчитывается с большим числом допущений и приближений, подробно описанных в [8, 9, 10]. Для тяговой сети они дополняются следующими [1, 2, 12]:

- не учитывается нагрузка неповрежденных плеч питания силовых (тяговых) трансформаторов (на рис. 1 фаза б), питающих контактную сеть смежных междоустановочных зон;
- не учитывается тяговая нагрузка в междоустановочной зоне с коротким замыканием.

Первое допущение связано с тем, что при коротком замыкании в отличие от нормального режима нагрузка смежных плеч питания оказывает крайне малое влияние на значения токов коротких замыканий I_A и I_B . Второе допущение учитывает, что при резком снижении напряжения в контактной сети с коротким замыканием силовая цепь электропоездов запирается, либо переходит в режим, благоприятствующий повышению чувствительности защиты.

Расчетными точками короткого замыкания при выборе уставок релейной защиты являются шины поста секционирования и шины смежной тяговой подстанции. Эквивалентное сопротивление цепи короткого

замыкания от источника выработки электроэнергии в системе внешнего электроснабжения до точки короткого замыкания в тяговой сети получается, как правило, настолько большим, что короткое замыкание считают удаленным [8] с периодической составляющей тока короткого замыкания, неизменной по амплитуде. В этих условиях расчетной схеме питания, приведенной на рис. 1, соответствует трехлинейная схема замещения прямой последовательности, показанная на рис. 3, а. Приняв

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A, \text{pac}} &= \dot{E}'_{C, A(a)} - \dot{E}'_{C, A(c)}, \text{ кВ}; \\ \dot{U}_{B, \text{pac}} &= \dot{E}'_{C, B(a)} - \dot{E}'_{C, B(c)}, \text{ кВ}, \end{aligned} \quad (3)$$

представим трехлинейную схему замещения в однолинейном исполнении (рис. 3, б), в которой

$$\begin{aligned} X_{n, A} &= 2(X'_{C, A} + X_{T, A}), \text{ Ом}; \\ X_{n, B} &= 2(X'_{C, B} + X_{T, B}), \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (4)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} Z_A &= jX_{n, A} + Z_{\text{тс}, A}, \text{ Ом}; \\ Z_B &= jX_{n, B} + Z_{\text{тс}, B}, \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z_{\text{тс}, A}, Z_{\text{тс}, B}$ — эквивалентные комплексные сопротивления схемы замещения тяговой сети многопутного участка. (Здесь и далее все сопротивления, обозначенные буквой Z , являются комплексными.)

Искомые токи I_A и I_B для этой схемы замещения вычисляют по формулам

$$I_A = \frac{\dot{U}_{A, \text{pac}} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_B} \right) - \dot{U}_{B, \text{pac}} \frac{Z_{AB}}{Z_B}}{Z_A + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_B} \right)} 10^3, \text{ А}; \quad (6)$$

$$I_B = \frac{\dot{U}_{B, \text{pac}} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_A} \right) - \dot{U}_{A, \text{pac}} \frac{Z_{AB}}{Z_A}}{Z_B + Z_{AB} \left(1 + \frac{Z_{AB}}{Z_A} \right)} 10^3, \text{ А}. \quad (7)$$

Значения токов, вычисленных по (6) и (7) не зависят от схемы соединения обмоток тяговых трансформаторов, поскольку сопротивление этих трансформаторов входит составной частью в сопротивления Z_A и Z_B . При вычислении наибольших значений токов I_A и I_B для максимального режима работы системы внешнего электроснабжения принимают линейные напряжения $U_{A, \text{pac}} = U_{B, \text{pac}} = 28,2 \text{ кВ}$. Наименьшее значение этих токов для минимального режима работы этой системы определяют при $U_{A, \text{pac}} = U_{B, \text{pac}} = 26,2 \text{ кВ}$.

Сопротивление тяговой сети. Сопротивления $Z_{\text{тс}, A}, Z_{\text{тс}, B}, Z_{AB}$ (рис. 3) зависят от конфигурации сети,

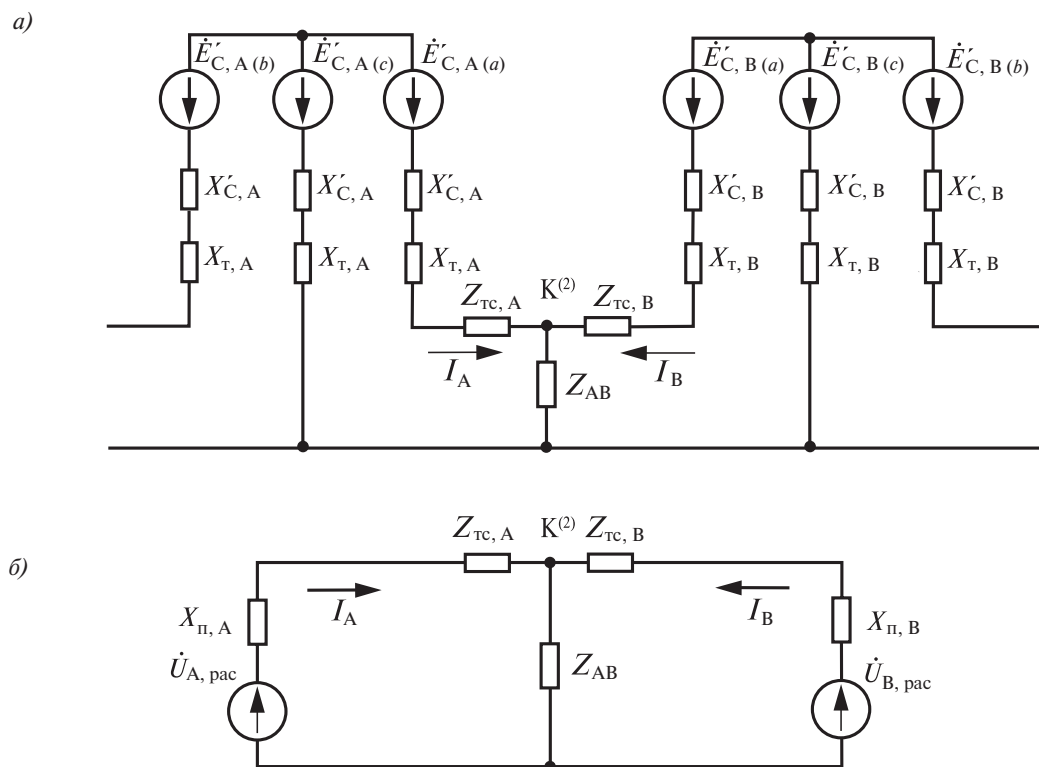


Рис. 3. Трехлинейная (а) и эквивалентная однолинейная (б) схемы замещения тяговой сети межподстанционной зоны при коротком замыкании:

$\dot{E}'_{C, A(a)}, \dot{E}'_{C, A(b)}, \dots, \dot{E}'_{C, B(c)}$ — приведенные к ступени среднего номинального напряжения тяговой сети фазовые ЭДС (фазы a, b и c) систем внешнего электроснабжения тяговых подстанций А и В соответственно; $\dot{U}_{A, pac}, \dot{U}_{B, pac}$ — расчетные напряжения тяговых подстанций А и В соответственно; $X'_{C, A}, X'_{C, B}$ — эквивалентные индуктивные, приведенные к среднему номинальному напряжению холостого хода на шинах, питающих контактную сеть, сопротивления фазы систем внешнего электроснабжения для тяговых подстанций А и В соответственно; $X_{T, A}, X_{T, B}$ — эквивалентные индуктивные, приведенные к ступени среднего номинального напряжения тяговой сети, сопротивления фазы силовых (тяговых) трансформаторов тяговых подстанций А и В соответственно; $X_{n, A}, X_{n, B}$ — эквивалентные сопротивления тяговых подстанций А и В соответственно

Fig. 3. Three-line (a) and equivalent single-line (b) circuit of traction network of the inter-station area in case of short circuit:

$\dot{E}'_{C, A(a)}, \dot{E}'_{C, A(b)}, \dots, \dot{E}'_{C, B(c)}$ — phase EMF voltage (phase a, b and c) of the external power supply systems of the traction substations А and В respectively, reduced to the level of the average nominal voltage of the traction network; $\dot{U}_{A, pac}, \dot{U}_{B, pac}$ — calculated voltages of the traction substations А and В respectively; $X'_{C, A}, X'_{C, B}$ — equivalent inductive phase resistance of external power supply systems for traction substations А and В respectively, reduced to the average nominal open circuit voltage on the buses supplying the contact network; $X_{T, A}, X_{T, B}$ — equivalent inductive phase resistance of the power (traction) transformers of the traction substations А and В respectively, reduced to the level of the average nominal voltage of the traction network; $X_{n, A}, X_{n, B}$ — equivalent resistance of the traction substations А and В respectively

схемы питания, расчетной точки короткого замыкания. Формулы для их вычисления приведены в [2, 3], а также в стандарте ОАО «РЖД» СТО РЖД 07.021.1–2015 «Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Ч. 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока».

Сопротивление трансформаторов. В каждой фазе схемы замещения системы электроснабжения мощный трансформатор учитывается сопротивлением X_T , определяемым по так называемому сопротивлению короткого замыкания X_K . При определении этого параметра X_K для трансформатора со схемой соединения обмоток $\dot{Y}/\Delta$ могут возникать, как показывает практика, некоторые сложности, поэтому остановимся на этом более подробно. Сопротивление трансформа-

тора X_T с любой схемой соединения обмоток принято вычислять на основании данных опыта короткого замыкания по формуле [12], на одну фазу

$$X_K = \frac{U_K 10^3}{I_K} = X_{*(ном)} \frac{U_\phi 10^3}{I_\phi} = \frac{u_K U_\phi 10^3}{100 I_\phi}, \text{ Ом}, \quad (8)$$

где U_K — фазное напряжение, кВ, подводимое к трансформатору при замкнутой накоротку обмотке вторичного напряжения и при условии, что фазный ток I_K , А, при коротком замыкании равен своему номинальному значению I_ϕ , $I_K = I_\phi$; $X_{*(ном)}$ — относительное значение сопротивления фазы трансформатора, равное $u_K/100$; U_ϕ — номинальное значение напряжения фазы, кВ.

Напряжение короткого замыкания u_k , %, для каждой обмотки указывается в паспорте трансформатора. Значение X_k удобно выразить через линейные номинальные величины напряжения $U_{\text{ном}}$ и тока $I_{\text{ном}}$, имея в виду, что для схемы соединения обмоток в звезду $U_{\phi} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3}$, $I_{\phi} = I_{\text{ном}}$, а для соединения в треугольник $U_{\phi} = U_{\text{ном}}$, $I_{\phi} = I_{\text{ном}} / \sqrt{3}$. Тогда для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y имеем

$$X_{k,Y} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\phi} 10^3}{I_{\phi}} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ном}} 10^3}{I_{\text{ном}} \sqrt{3}} \times \left(\frac{U_{\text{ном}}}{U_{\phi}} \right) = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

а для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ получаем

$$X_{k,\Delta} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\phi} 10^3}{I_{\phi}} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\phi} 10^3}{I_{\phi}} \left(\frac{U_{\phi}}{U_{\phi}} \right) = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_1} = \frac{u_k}{100} \frac{3U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{ном}}$, S_1 — номинальная мощность трансформатора и мощность одной его фазы, МВ·А.

Значения $X_{k,Y}$ и $X_{k,\Delta}$ отличаются в 3 раза. Поскольку $u_k/100 = X_{*(\text{ном})}$, то выражение (9) приведено к базисным параметрам для схемы замещения системы электроснабжения (рис. 3). При этом в каждой фазе сопротивление $X_{k,Y}$ включено последовательно с фазной ЭДС источника питания.

Иначе обстоит дело с сопротивлением $X_{k,\Delta}$, которое не отвечает условиям (2), так как относительное сопротивление $u_k/100$ отнесено здесь не к номинальной мощности трансформатора, а только к мощности одной его фазы. При этом сопротивление $X_{k,\Delta}$ включено последовательно не с фазной, а с линейной ЭДС источника питания и поэтому не может использоваться в схеме замещения, приведенной на рис. 3. Схема замещения энергосистемы, в которой может использоваться сопротивление $X_{k,\Delta}$, должна иметь вид треугольника, причем в каждой фазе сопротивления всех других элементов, определяемые через относительные единицы, должны быть приведены к мощности одной фазы соответствующего элемента или пересчитаны от фазного напряжения к линейному. Такая схема замещения приведена в [13].

Для возможности использования сопротивления $X_{k,\Delta}$ в схеме замещения энергосистемы, предусмотренной стандартом [8], его надо привести к базисным условиям по формулам

$$\dot{X}_T = \dot{X}_{k,\Delta} = X_{k,\Delta} \frac{S_1}{S_{\text{ном}}} = X_{k,\Delta} \frac{U_{\phi}^2}{U_{\text{ном}}^2} = \frac{X_{k,\Delta}}{3}. \quad (11)$$

Из сопоставления выражения (9) с формулами (10) и (11) следует, что при одинаковых значениях

$u_k/100$ приведенные к одинаковым базисным условиям сопротивления трансформатора при обмотках, соединенных звездой и соединенных треугольником, одинаковы. Поэтому приведенное сопротивление трансформатора считают не зависящим от схемы соединения его обмоток, что специально оговорено также в [11, 14, 15] и учитывается в [8, 9, 10].

В отдельных случаях, к сожалению, сопротивления $X_{k,\Delta}$, вычисляемые по формуле (10) и не приведенные к базисным условиям, ошибочно используют в схеме замещения, показанной на рис. 3. Это и является неявной причиной расхождения расчетов, отмеченных в [5].

Таким образом, для вычисления сопротивления фазы трансформатора в схеме замещения, приведенной на рис. 3, а, сведения о схеме соединения его обмоток не требуются и применяют формулу [8, 9, 10, 11].

$$\dot{X}_T = \frac{u_k}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_T}, \text{ Ом.} \quad (12)$$

В этой формуле u_k выражено в процентах, $U_{\text{ном}}$ в кВ, а S_T в МВ·А.

Во избежание иногда встречающегося неточного толкования следует подчеркнуть, что при вычислении по формуле (12) сопротивления двух- или трехобмоточного трансформатора (для любой обмотки или пары обмоток) в схеме замещения системы электроснабжения при двух- или трехфазном коротком замыкании сведений о схеме и группе соединения обмоток трансформатора не требуется.

В дальнейшем предполагаем, что сопротивление всех элементов, входящих в схему замещения по рис. 3, а и др., являются приведенными к единым базисным условиям, и кружок над их обозначением ставить не будем.

Эквивалентирование внешней системы электроснабжения. При проектировании тяговой сети на перспективу полная схема внешней системы электроснабжения, принадлежащая территориальным сетевым и (или) иным энергоснабжающим организациям, к электрическим сетям которых подключаются тяговые подстанции, как правило, неизвестна. Не раскрывается она полностью и в период текущей эксплуатации железной дороги. Вместе с тем в [8] допускается эквивалентировать удаленную от места короткого замыкания часть электроэнергетической системы. В настоящее время используется практика такого эквивалентирования с помощью эквивалентных индуктивных приведенных сопротивлений прямой последовательности X'_C ($X'_{C,A}$, $X'_{C,B}$) фазы эквивалентной системы внешнего электроснабжения, указанных на рис. 3, а. Значения этих сопротивлений X'_C для каждой тяговой подстанции, приведенные к среднему номинальному напряжению сети, питающей тяговую подстанцию, сообщаются сетевой организацией, к которой данная подстанция подключена. Вместо значения X'_C сетевая организация может сообщить значение тока $I_k^{(3)}$, кА, или мощности

$S_k^{(3)}$, МВ·А, трехфазного короткого замыкания на вводах в данную тяговую подстанцию. В этом случае сопротивление X_C согласно [8] вычисляют по формуле

$$X_C = \frac{U_{\text{ср. ном}}}{\sqrt{3} I_k^{(3)}} = \frac{U_{\text{ср. ном}}^2}{S_k^{(3)}}, \text{ Ом}, \quad (13)$$

где $U_{\text{ср. ном}}$ — среднее номинальное напряжение сети, питающей вводы высокого напряжения тяговой подстанции, кВ.

Сопротивление X'_C , приведенное к основному напряжению 27,5 кВ тяговой сети в схеме замещения, вычисляют по известной формуле

$$X'_C = X_C \left(\frac{27,5}{U_{\text{ср. ном}}} \right)^2, \text{ Ом}. \quad (14)$$

Входное сопротивление $X_{\text{п}}$ тяговой подстанции (рис. 2, в и рис. 3, б) в этом случае имеет вид

$$X_{\text{п}} = 2(X'_C + X_{\text{т}}) = 2 \left(\frac{27,5^2}{S_k^{(3)}} + \frac{u_k}{100} \frac{27,5^2}{S_{\text{ном}}} \right). \quad (15)$$

Такая формула приведена в [2, 3], а также другим путем получена в [5, 6]. Если при определении $X_{\text{п}}$ ошибочно использовать в качестве X'_C и $X_{\text{т}}$ не приведенные по (2) и схеме замещения по рис. 3, а значения [8], а отнесенные к мощности только одной фазы (как сопротивление $Z_{\text{к.д}}$), то результат окажется в 3 раза больше. Таким образом, упомянутые выше расхождения в расчетах могут быть обусловлены и тем, что сопротивления, величины которых в именованных единицах определяются через их относительные значения, ошибочно не приводятся к базовым условиям стандартной схемы замещения [8].

Вычисление X'_C по параметрам трехфазного короткого замыкания на вводах в тяговую подстанцию является самым простым способом учета влияния системы внешнего электроснабжения на токи короткого замыкания тяговой сети.

В определенных условиях, как было отмечено выше, такой упрощенный подход для некоторых схем внешнего питания тяговых подстанций и двустороннем питании тяговой сети может вызвать погрешность при вычислении искомых токов по формулам (6), (7).

Более точное эквивалентирование удаленной части системы внешнего электроснабжения обеспечивается, если в качестве источников энергии принять так называемые опорные сетевые или тяговые подстанции [1, 7], от которых по высоковольтным линиям электропередачи питаются все транзитные (промежуточные) проходные или на отпайках тяговые подстанции. Эквивалентную приведенную ЭДС фазы $E'_{\text{с.о}}$ опорной подстанции принимают равной

$$E'_{\text{с.о}} = \frac{27,5}{\sqrt{3}}, \text{ кВ}. \quad (16)$$

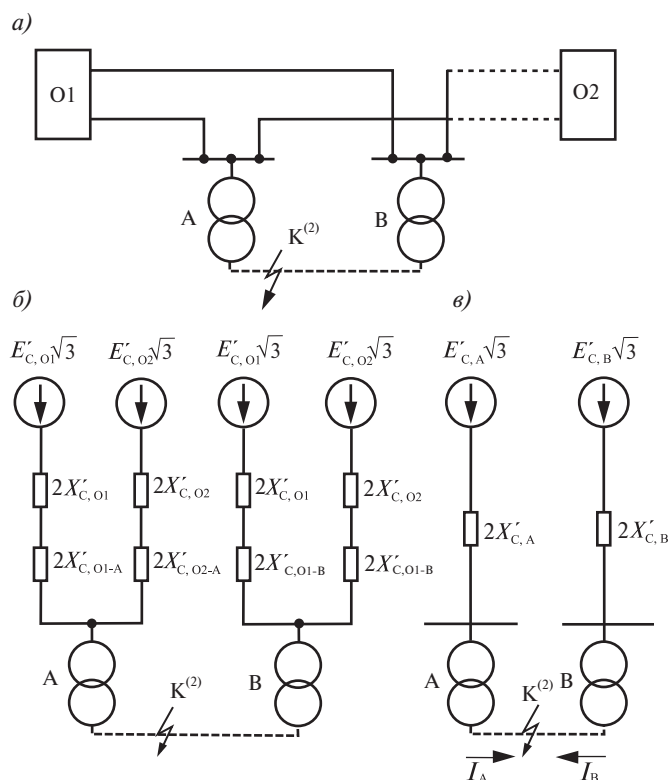


Рис. 4. Упрощенные схемы питания и замещения при двустороннем питании от двухцепной высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения: а — схема питания; б и в — схемы замещения; O1 и O2 — опорные подстанции

Fig. 4. Simplified power supply and replacement schemes with two-way power from a double-circuit high-voltage power line for longitudinal power supply: а — power circuit; б and в — equivalent schemes; O1 и O2 — master substations

Сопротивление фазы $X_{\text{с.о}}$ эквивалентной энергосистемы для опорной подстанции вычисляют по формулам (13, 14). Если значения $I_k^{(3)}$ и $S_k^{(3)}$ неизвестны, то вместо них используют значение номинального отключаемого тока или номинальной отключаемой мощности тех выключателей опорной подстанции, к которым подключены высоковольтные линии электропередачи, питающие тяговые подстанции [9]. Сопротивление высоковольтных линий электропередачи вычисляют по [8, 9]. Сопротивление $X'_{\text{с.о}}$ опорной подстанции и линии электропередачи $X'_{\text{с.л}}$, приведенные к основному (базовому) напряжению схемы замещения, в качестве которого принято 27,5 кВ, вычисляют по (2).

Рассмотрим далее три наиболее характерных схемы питания тяговых подстанций от опорных:

- каждая тяговая подстанция питается от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения;
- тяговые подстанции получают питание от высоковольтной двухцепной линии электропередачи продольного электроснабжения при ее двустороннем питании от разных опорных подстанций;

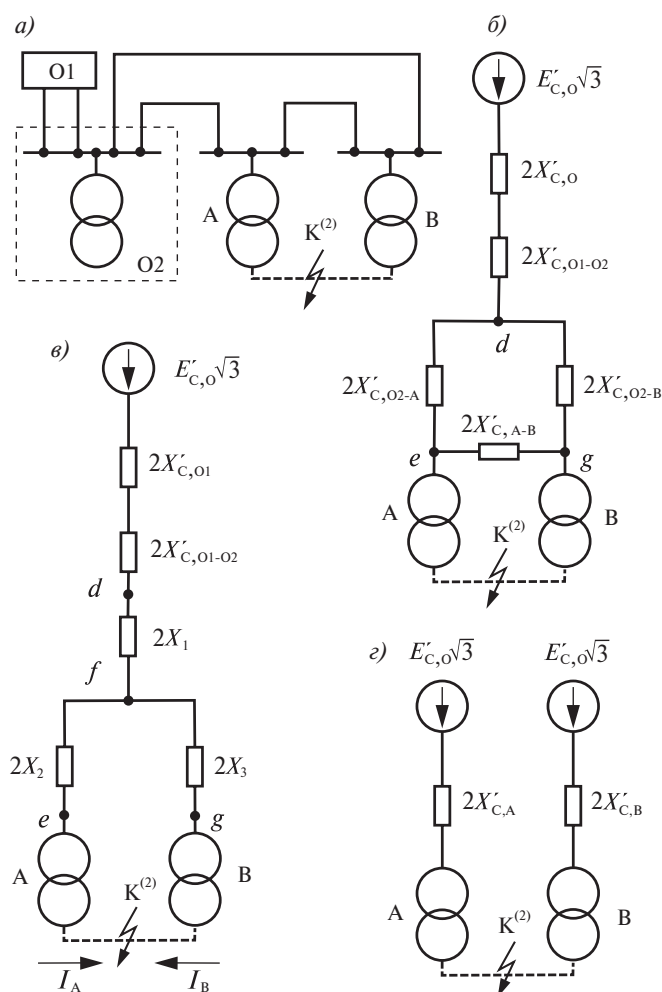


Рис. 5. Упрощенные схемы питания и замещения при одностороннем питании от двухцепной высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения:

a — схема питания; *б, в, г* — схемы замещения
 Fig. 5. Simplified power supply and replacement schemes with one-way power from a double-circuit high-voltage power line for longitudinal power supply:

a — power circuit; *б, в, г* — equivalent schemes

• тяговые подстанции получают питание от двух высоковольтных линий электропередачи по кольцевой схеме от одной опорной тяговой подстанции, которая двухцепной линией соединена с опорной сетевой подстанцией.

Если смежные тяговые подстанции получают питание каждая от своей опорной подстанции, входящей в электрически не связанную систему внешнего электроснабжения, то эквивалентные приведенные сопротивления $X'_{C,A}$ и $X'_{C,B}$, показанные на рис. 3, *a*, вычисляются по формуле

$$X'_C = X'_{C,O} + X'_{C,l}, \text{ Ом.} \quad (17)$$

Для опорной сетевой понизительной подстанции, совмещенной с опорной тяговой подстанцией, очевидно, $X'_{C,l} = 0$.

На рис. 4, *a* приведена упрощенная схема питания смежных тяговых подстанций А и В от двухцепной линии продольного электроснабжения при двустороннем питании от опорных (сетевых или тяговых) подстанций О1 и О2. Схему замещения системы внешнего электроснабжения можно представить в виде, приведенном на рис. 4, *б*, в которой каждая из тяговых подстанций подключена к двум источникам питания О1 и О2 с эквивалентными приведенными фазными ЭДС соответственно $E'_{C,O1}$ и $E'_{C,O2}$ (линейными напряжениями $E'_{C,O1}\sqrt{3}$ и $E'_{C,O2}\sqrt{3}$) и их фазными сопротивлениями $X'_{C,O1}$ и $X'_{C,O2}$. Эквивалентное приведенное сопротивление линий электропередачи от тяговой подстанции А до опорной подстанции О1 имеет обозначение $X'_{C,O1-A}$, а до опорной подстанции О2 обозначено $X'_{C,O2-A}$. Соответственно, эквивалентное приведенное сопротивление линий электропередачи от тяговой подстанции В до опорной подстанции О1 имеет обозначение $X'_{C,O1-B}$, а до опорной подстанции О2 обозначено $X'_{C,O2-B}$.

Эквивалентные ЭДС $E'_{C,O1}$ и $E'_{C,O2}$ вычисляются по (16). Если на практике они не одинаковы, то следует учесть их различия. Эквивалентные приведенные сопротивления опорных подстанций $X'_{C,O1}$ и $X'_{C,O2}$ вычисляются по формулам (13) и (14). Сопротивление единицы длины участков линий электропередачи, принимаемые по [8, 9], приводят к основному (базовому) напряжению по (2) и умножают на соответствующую длину. Используя правила преобразования схемы замещения, получим результирующую схему замещения системы внешнего электроснабжения, приведенную на рис. 4, *в*, в которой

$$E'_{C,A} = \frac{E'_{C,O1}(X'_{C,O2} + X'_{C,O2-A}) + E'_{C,O2}(X'_{C,O1} + X'_{C,O1-A})}{X'_{C,O1} + X'_{C,O1-A} + X'_{C,O2} + X'_{C,O2-A}};$$

$$E'_{C,B} = \frac{E'_{C,O1}(X'_{C,O2} + X'_{C,O2-B}) + E'_{C,O2}(X'_{C,O1} + X'_{C,O1-B})}{X'_{C,O1} + X'_{C,O1-B} + X'_{C,O2} + X'_{C,O2-B}}.$$

$$X'_{C,A} = \frac{(X'_{C,O1} + X'_{C,O1-A})(X'_{C,O2} + X'_{C,O2-A})}{X'_{C,O1} + X'_{C,O1-A} + X'_{C,O2} + X'_{C,O2-A}};$$

$$X'_{C,B} = \frac{(X'_{C,O1} + X'_{C,O1-B})(X'_{C,O2} + X'_{C,O2-B})}{X'_{C,O1} + X'_{C,O1-B} + X'_{C,O2} + X'_{C,O2-B}}.$$

Эти значения используются в схеме замещения, показанной на рис. 3, *a*. Значения $E'_{C,A}$ и $E'_{C,B}$ при их равенстве принимают по (16).

Схема одностороннего кольцевого питания тяговых подстанций А и В двумя линиями от опорной сетевой подстанции О1 через опорную тяговую подстанцию О2 и ее схема замещения показаны на рис. 5. Фазная ЭДС опорной подстанции О1 обозначена $E'_{C,O1}$, а ее эквивалентное фазное сопротивление $X'_{C,O1}$. При-

веденное сопротивление фазы высоковольтной линии между опорными подстанциями О1 и О2 обозначено $X'_{C,O1-O2}$. Сопротивление фаз высоковольтной линии между опорной подстанцией О2 и тяговыми подстанциями А и В обозначены соответственно $X'_{C,O2-A}$, $X'_{C,O2-B}$ и $X'_{C,A-B}$ (рис. 5, б).

Треугольник сопротивлений между точками d , e , g на рис. 5, б может быть преобразован в звезду, состоящую из сопротивлений X_1 , X_2 и X_3 , показанных на рис. 5, в. Их значения равны [8]

$$X_1 = \frac{X'_{C,O2-A} X'_{C,O2-B}}{X'_{C,O2-A} + X'_{C,O2-B} + X'_{A-B}}, \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X'_{C,O2-A} X'_{A-B}}{X'_{C,O2-A} + X'_{C,O2-B} + X'_{A-B}}, \text{ Ом};$$

$$X_3 = \frac{X'_{C,O2-B} X'_{A-B}}{X'_{C,O2-A} + X'_{C,O2-B} + X'_{A-B}}, \text{ Ом}.$$

Схема, приведенная на рис. 5, в, обычным путем преобразуется в схему, показанную на рис. 5, г, в которой

$$X'_{C,A} = (X'_{C,O1} + X'_{C,O1-O2} + X_1) \left(1 + \frac{Z_{A,\Phi}}{Z_{B,\Phi}} \right) + X_2;$$

$$X'_{C,B} = (X'_{C,O1} + X'_{C,O1-O2} + X_1) \left(1 + \frac{Z_{B,\Phi}}{Z_{A,\Phi}} \right) + X_3.$$

Комплексные сопротивления $Z_{A,\Phi}$ и $Z_{B,\Phi}$ для этой схемы вычисляются по выражениям

$$Z_{A,\Phi} = j2(X_2 + X_{T,A}) + Z_{TC,A};$$

$$Z_{B,\Phi} = j2(X_3 + X_{T,B}) + Z_{TC,B}.$$

Подобным образом определяют значения $X'_{C,A}$, $X'_{C,B}$ и для других схем питания тяговых подстанций.

Заключение. 1. При отсутствии сведений о системе внешнего электроснабжения в целом следует ее эквивалентировать относительно опорных сетевых или тяговых подстанций.

2. ЭДС и сопротивление элементов системы внешнего электроснабжения используются, как правило, в именованных единицах и должны быть определены в соответствии с [7, 8, 9, 10]. При этом особое внимание следует обратить на то обстоятельство, что для прямой и обратной последовательности при заданном напряжении короткого замыкания u_k , % приведенное сопротивление X_T фазы двух- и многообмоточных трансформаторов от схемы соединения обмоток не зависит.

3. Предложенные методики учета параметров системы внешнего электроснабжения могут быть использованы при проектировании электрификации железных дорог и в условиях текущей эксплуатации, а также при авариях на высоковольтной линии электропередачи продольного электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1983. 528 с.
2. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учеб. для вузов в 2 ч. Ч. 2. 3-е изд. перераб. и доп. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. 604 с.
3. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения / ОАО «РЖД». М.: Трансиздат, 2005. 216 с.
4. Кучма К. Г., Марквардт Г. Г., Пупынин В. Н. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. М.: Трансжелдориздат, 1960. 260 с.
5. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 329–335. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335>.
6. Герман Л. А., Субханвердиев К. С. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменных токов при учете внешнего электроснабжения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 3. С. 17–23.
7. Силовое оборудование тяговых подстанций железных дорог (сборник справочных материалов) / ОАО «РЖД». М.: Трансиздат, 2004. 384 с.
8. ГОСТ Р 52735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ: введен 01.07.2008. М.: Стандартинформ, 2007. 36 с.
9. РД 153–34.0–20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / РАО «ЕЭС России». М.: НЦ ЭНАС, 2002. 152 с.
10. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.; Л.: Энергия, 1964. 704 с.
11. Тяговые подстанции / Ю. М. Бей [и др.]: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1986. 319 с.
12. Вольдек А. И. Электрические машины: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
13. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11 / С. А. Серебряков [и др.] // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 5. С. 19–25.
14. Караев Р. И., Волобринский С. Д., Ковалев И. Н. Электрические сети и энергосистемы: учеб. для вузов. М.: Транспорт, 1988. 328 с.
15. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с. (Руководящие указания по релейной защите; вып. 11).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖАРКОВ Юрий Иванович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ПОПОВА Наталия Андреевна,

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

ФИГУРНОВ Евгений Петрович,

д-р техн. наук, профессор, кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г., актуализирована 19.11.2018 г., принята к публикации 14.01.2019 г.

Accounting power supply schemes for traction substations in the calculation of short circuits in the AC traction network

Yu. I. ZHARKOV, N. A. POPOVA, E. P. FIGURNOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State University of Railway Engineers" (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

Abstract. When calculating short-circuit currents in the AC traction network, it is assumed that each of the traction substations receives power from uncoupled external power supply sources with known resistances. In some cases, especially when powering a group of traction substations from a high-voltage power line of a longitudinal power supply, the external power supply system affects not only the magnitude of short-circuit currents, but also their redistribution between adjacent traction substations of the interstation area where this circuit is considered. Such unrecorded redistribution can have a negative effect on short circuit protection.

The article considers the equivalent circuit of the traction network, taking into account resistance of the external power supply system. Particular attention is paid to the fact that in replacement circuits of direct and negative sequence value of reduced resistance of one phase of a multiwinding transformer, calculated from the short circuit voltage, does not depend on the connection scheme of its windings. It is noted that in some cases it is difficult to obtain a complete scheme of an external power supply system. Considering that the short circuit in the traction network for the external power supply system is remote, it is proposed taking into account the reference network or traction substations as power sources, from which high-voltage transmission lines power the traction substations. Resistance of the supporting substations as power sources must take into account connected equivalent power system.

Such equivalent should be carried out by known values of currents or short-circuit powers at the inputs of the reference substation or, if such information is not available, by the rated values of the switched-off currents or powers of the switches of high-voltage line connections.

The following power schemes for traction substations are considered: each from its own supporting substation, which is part of an electrically uncoupled external power supply system; from the double-circuit high-voltage line of longitudinal power supply when it is powered from different supporting substations; from the supporting network substation, the traction substation receives power from two lines, and from this the traction substations receive power from two lines in a circle pattern.

These three common cases cover all the most common power schemes for traction substations. For each of them formulas are given to determine the resulting equivalent resistance of the external power supply circuit, which should be taken into account in the replacement circuit of the traction network.

Keywords: traction network; short-circuits; external power supply system; external power supply schemes; replacement schemes; resistances; currents

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18>

REFERENCES

1. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog. Ucheb. dlya vuzov zh.-d. transporta* [Power supply of electrified railways. Textbook for universities of railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1983, 528 p.
2. Figurnov E.P. *Releynaya zashchita. Ucheb. dlya vuzov v 2 ch. Ch. 2. 3-e izd. pererab. i dop.* [Relay protection. Textbook for high schools in 2 parts. Part 2. 3rd edition revised and enlarged]. Moscow, GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" [State Educational Institution "Educational and Methodical Center for Education in Railway Transport"] Publ., 2009, 604 p.

■ E-mail: asel@rgups.ru (N. A. Popova)

3. *Guidelines for relay protection of traction power systems*. Moscow, JSC "RZD", Transizdat Publ., 2005, 216 p.

4. Kuchma K.G., Markvardt G.G., Pupynin V.N. *Zashchita ot tokov korotkogo замыкания в контактной сети* [Protection against short-circuit currents in the contact network]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1960, 260 p.

5. Kosarev A.B., Kosarev B.I. *Metodika rascheta tokoraspre-deleniya v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Calculation methodology of current distribution in traction networks of AC current]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 6, pp. 329-335. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-329-335>.

6. German L.A., Subkhanverdiev K.S. *Calculations of short circuit currents in the traction network of alternating currents when accounting for external power supply*. Electronics and electrical equipment of transport, 2017, no. 3, pp. 17–23.

7. *Power equipment for traction substations of railways (collection of reference materials)*. Moscow, JSC "RZD", Transizdat Publ., 2004, 384 p.

8. GOST R 52735–2007. *Short circuits in electrical installations. Calculation methods for electrical installations of alternating current of voltage above 1 kV*. Put into force 01.07.2008. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 36 p. (in Russ.).

9. RD 153-34.0-20.527-98. *Guidelines for calculating short circuit currents and selecting electrical equipment*. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002, 152 p. (in Russ.).

10. Ul'yanov S.A. *Electromagnetic transients in electrical systems*. Moscow, St. Petersburg, Energiya Publ., 1964, 704 p.

11. Bey Yu.M., Mamoshin R.R., Pupynin V.N., Shalimov M.G. *Traction substations. Textbook for high schools*. Moscow, Transport Publ., 1986, 319 p.

12. Vol'dek A.I. *Electric machines*. Textbook for high schools. 2nd edition revised and enlarged. St. Petersburg, Energiya Publ., 1974, 840 p.

13. Serebryakov A.S., German L.A., Osokin V.L., Subkhanverdiev K.S. *Analysis of methods for calculating short-circuit currents of the transformer when connecting the windings according to the scheme Y/Δ-11*. Electronics and electrical equipment of transport, 2017, no. 5, pp. 19–25.

14. Karaev R.I., Volobinskiy S.D., Kovalev I.N. *Electrical networks and power systems*. Textbook for universities. Moscow, Transport Publ., 1988, 328 p.

15. *Calculations of short circuit currents for relay protection and system automation in 110–750 kV networks* (Relay Protection Guidelines; is.11). Moscow, Energiya Publ., 1979, 152 p.

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy I. ZHARKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Nataliya A. POPOVA,

Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Evgeniy P. FIGURNOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Automated power supply systems", FGBOU VO RGUPS

Received 29.10.2018

Revised 19.11.2018

Accepted 14.01.2019

Результаты комплексных исследований, проведенных ЦНИИ (ВНИИЖТ), и строительных работ МПС (РЖД) по увеличению габаритов грузового и пассажирского подвижного состава на железных дорогах Российской Федерации

Ю. М. ЛАЗАРЕНКО¹, Д. Н. АРШИНЦЕВ¹, О. Н. НАЗАРОВ², Ю. С. КИРЕЕВА²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Департамент технической политики открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ЦТех ОАО «РЖД»), Москва, 107174, Россия

Аннотация. В статье приводятся содержание и результаты комплекса исследований по научно-методическому обеспечению модернизации искусственных сооружений и устройств, построенных по старым габаритным нормам или исчерпавших ресурс своей прочности, всей сети железных дорог колеи 1520 (1524) мм под габарит подвижного состава Т, позволяющий увеличить осевые и погонные нагрузки вагонов и за счет этого — массу поездов, а также решить глобальную, возникшую в середине прошлого века проблему по повышению эффективности работы важнейшей отрасли России — железнодорожно-го транспорта.

Были разработаны варианты увеличенных габаритов ($T_{пр}$ — для любого подвижного состава, $T_{ц}$ — для цистерн, $T_{а}$ — для электроподвижного состава, $T_{б}$ — для пассажирских вагонов), учитывающий их ГОСТ 9238–83 «Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений» и инструкции МПС по его применению (№ ЦП/4425 — по габаритам приближения строений; № ЦВ/4422 — по габаритам подвижного состава и № ЦД/4172 — по перевозкам негабаритных и тяжеловесных (необычных) грузов), а также зональный и контрейлерный габариты погрузки.

Ключевые слова: увеличенный габарит подвижного состава; двухэтажные пассажирские вагоны; подготовка маршрутов обращения двухэтажных вагонов; габарит приближения строений объектов инфраструктуры; контрольное очертание приближения строений; габариты подвижного состава

Основание и основные задачи исследований. Развитие железнодорожного транспорта обусловлено проблемой освоения возрастающих объемов перевозок [1, 2, 3, 4, 5].

В юбилейных приветствиях ученых в честь 100-летия АО «ВНИИЖТ» прежде всего отмечалось, что именно институт всегда определял главные направления технического и технологического развития отечественных железных дорог и роста эффективности важнейшей отрасли Российской Федерации.

Одно из таких направлений ЦНИИ МПС (в настоящее время — АО «ВНИИЖТ») начал разрабатывать

в середине прошлого века, когда железнодорожный транспорт СССР испытывал острую необходимость в принятии мер по освоению перспективного объема перевозок. Новых способов повышения провозной способности железных дорог требовало прогнозируемое к 1990 г. увеличение грузооборота до 4950 млрд т·км вместо 2558 млрд т·км в 1970 г.

Традиционными методами повышения провозной способности являются: увеличение скоростей движения, строительство разгружающих линий и вторых путей, электрификация линий, реконструкция станций. Данные требования не обеспечивались, в связи с чем возник вопрос о подготовке железных дорог к созданию в перспективе нового подвижного состава с улучшенными технико-экономическими показателями, включающими повышенные осевые и погонные нагрузки вагонов, которые позволяют увеличить массу поездов и, соответственно, грузооборот, а значит — решить перспективную проблему.

Способ решения проблемы — увеличение габаритов подвижного состава до максимально возможного габарита Т. Исходя из этого, научно-технический совет МПС СССР поручил ЦНИИ МПС провести комплексные исследования по выявлению ограничений на применение габарита подвижного состава Т, разработанного в 1925 г. и введенного в 1934 г. отраслевым стандартом ОСТ/ВКС 6435 в качестве перспективного под обозначением 2В (вагоны) и 2П (паровозы), а также определить меры по их устранению. Решение поставленной перед ЦНИИ МПС задачи казалось возможным при изменении фундаментальных взаимозависимых параметров железных дорог — габаритов приближения строений и подвижного состава, в разработках которых институт занимал в прошлом веке ведущую роль и сохранил ее и в настоящее время.

■ E-mail: lazarenko_um@list.ru (Ю. М. Лазаренко)

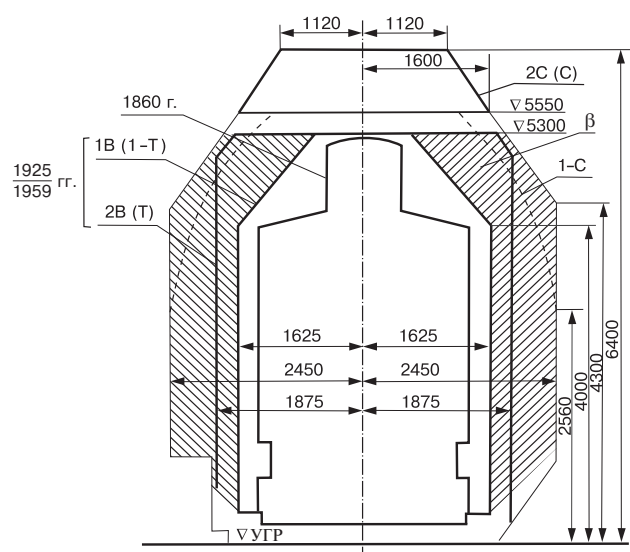


Рис. 1. Развитие габаритов подвижного состава железных дорог Российской Федерации колеи 1520 мм
Fig. 1. Development of loading gauge of rolling stock of 1520 mm gauge railways of the Russian Federation



Рис. 2. Этапы и содержание работ, выполненных с 1957 г. по настоящее время в целях создания нового подвижного состава с увеличенным габаритом
Fig. 2. Stages and content of works performed from 1957 to the present in order to create a new rolling stock with an increased loading gauge

Ученым предстояло исследовать свободное габаритное пространство у всех сооружений и устройств железных дорог общей сети и промышленных предприятий посредством квантования внутреннего по-

граничного слоя β между первыми и последующими габаритами (рис. 1, 2) с целью использования его для разработки предложений по увеличению существующих габаритов для создания нового грузового и пассажирского подвижного состава и их габаритов погрузки.

Для решения поставленной перед ЦНИИ МПС задачи необходимо было разработать принципиально новые методики, подготовить на всех железных дорогах кадры для служб пути, СЦБ и связи, энергетики, движения, а также:

- провести совместно с железными дорогами натурное обследование габаритов приближения строений (габаритную классификацию) сотен тысяч объектов инфраструктуры, определить стоимость и возможные сроки устранения выявленных нарушений действовавших и перспективных габаритных норм;
- подготовить директивные документы по модернизации объектов инфраструктуры, имеющих недостаточные размеры;
- обеспечить методическое руководство и контроль за ходом модернизации выявленных негабаритных объектов инфраструктуры под требуемые габаритные нормы.

Для выполнения комплекса работ, включающего не только научно-методические работы института, но и обследовательские работы габаритообследовательских станций дорог, а также строительных организаций по модернизации инфраструктуры, потребовалось 60 лет. Широкое внедрение результатов выполненной работы, получившей признание не только МПС СССР и Совета Министров СССР, а в дальнейшем и ОАО «РЖД», началось в XXI в. [6–12].

В результате обработки полученных материалов габаритной классификации установлено, что основная часть протяженности главных путей перегонов и станций, а также большинство инженерных сооружений (кроме платформ) отвечают требованиям действующего габарита приближения строений С (табл. 1).

Было установлено, что большинство негабаритных тоннелей (61 %) построено до 1925 г., когда действовал габарит приближения строений 1860–1893 гг., совпадающий в основном с габаритом 1-С, и примерно половина из них не отвечает указанному габариту. Протяженность негабаритных тоннелей и галерей, как правило, — до 300 м. Негабаритности тоннелей расположены в основном в кривых (80 %), радиус которых в 78 тоннелях и 16 галереях менее 350 м (до 200 м). На двухпутных линиях в 17 тоннелях имеются негабаритные междупутья, величина которых в 9 случаях (например, на Дальневосточной железной дороге) менее 3750 мм. Поскольку при указанном междупутье затруднена эксплуатация даже существующего

подвижного состава, то реконструкция таких тоннелей планировалась в первую очередь.

Среди существующих негабаритных мостов 91 % конструкций предназначен для езды понизу, а остальные 9 % — для езды посередине. Примерно половина негабаритных мостов (45 %) в основной зоне отвечает габариту С, но имеет негабаритность в нижней и верхней зонах конструкции. Эти негабаритности на условия пропуска подвижного состава и основной массы негабаритных грузов влияния, как правило, не оказывают и могут быть сохранены до полной реконструкции мостов.

Наиболее характерной негабаритностью мостов с ездой понизу являются недостаточные размеры порталных рам и верхних связей, а у путепроводов и пешеходных мостов — недостаточная их удаленность от оси пути опор и их фундаментов. Некоторая часть негабаритных мостов (37 %) построена по расчетным нормам, действовавшим до 1925 г., в связи с чем необходимость их переустройства обуславливается прочностью конструкции и техническим состоянием.

Рассмотренные крупные сооружения по количеству составляют всего лишь 4 % от общего числа негабаритностей. Остальные — это здания, светофоры и семафоры, опоры, гидроколонки, платформы и прочие устройства, работы по которым не требуют крупных инвестиций и могут быть выполнены балансодержателем.

Перспективы ввода увеличенных габаритов подвижного состава на сети дорог. Анализ результатов классификации сооружений и устройств позволил установить следующее:

1. Тоннели, как правило, соответствуют ранее действовавшему габариту 1-С.

2. Многие мосты с ездой понизу также построены по габариту 1-С и имеют недостаточную грузоподъемность для пропуска вагонов габарита Т с повышенной погонной нагрузкой.

3. Для разгрузки полувагонов габарита Т потребуется модернизация большинства эксплуатируемых вагоноопрокидывателей и других грузовых устройств.

4. Междупутья станционных путей не обеспечивают технику безопасности станционного персонала при обслуживании вагонов габарита Т.

С учетом указанных результатов был сделан вывод, что внедрение полного габарита Т на всей сети железных дорог для грузовых вагонов до завершения работ по реконструкции негабаритных искусственных сооружений и замены мостов, имеющих недостаточную прочность, является преждевременным и ставит задачу о поэтапном переходе к полному габариту Т.

Из приведенных в табл. 1 данных о результатах габаритной классификации сети следует, что целе-

Таблица 1

Соответствие инженерных сооружений габариту приближения строений С

Table 1

Compliance of engineering structures with the structure clearance of C standard

Наименование объектов	Соответствие габариту С (в % от общего количества)
Главные пути перегонов и станций (эксплуатационная длина)	70*
Мосты	99
Тоннели	52
Галереи	71
Путепроводы	86
Пешеходные мосты	71
Подпорные стенки	93
Высокие платформы	36
Низкие платформы	45

* При определении этой величины учтена протяженность перегонов главных путей станций, в пределах которых нет ни одного негабаритного объекта

сообразно рассмотреть поэтапный переход к созданию вагонов габарита Т для массового строительства грузового и пассажирского подвижного состава. В связи с этим были разработаны промежуточные варианты увеличенных габаритов подвижного состава и погрузки, внедрение которых требовало меньших инвестиций, но обеспечивало получение высокого

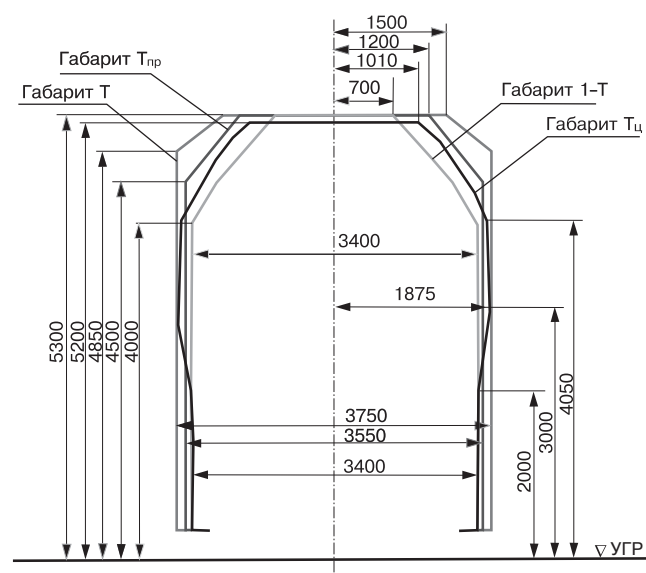
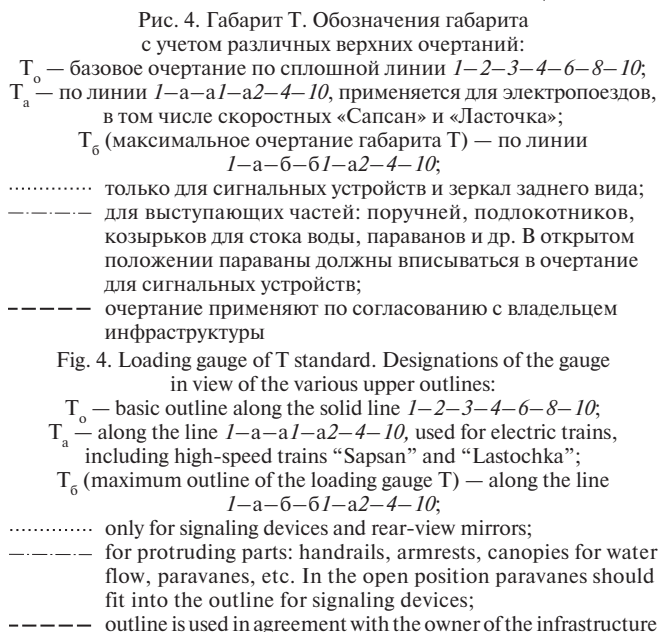


Рис. 3. Сравнительные характеристики вариантов увеличенных габаритов подвижного состава, которые могут быть приняты для подготовки сети к созданию нового, более эффективного подвижного состава

Fig. 3. Comparative characteristics of increased loading gauge options of rolling stock, which can be taken to prepare the network to create a new, more efficient rolling stock



во-первых, пространство, представляемое габаритом T_{in} для конструирования подвижного состава,

С учетом этого по заказу ОАО «РЖД» в 2005 г. АО «Алтайвагон» было изготовлено и введено в

Table 2

Параметры	1-ВМ серийная модель 12-132	Т _{пр}			
		глухие		с люками в полу	
Нагрузка на ось, т	23,5	23,5	25	23,5	25
Погонная нагрузка, т/м	6,75	7,77	8,26	7,77	8,26
Грузоподъемность, т	70	71	76	71	75
Масса угля в поезде (т) при длине станционных путей:					
— 850 м	4270	4970	5320	4970	5250
— 1050 м	5250	6106	6536	6106	6450

Производство грузовых вагонов габарита Т_{пр} было организовано и на других предприятиях, а именно: ЗАО «Промтрактор-вагон», заводах, входящих в ПАО «НПК Объединенная Вагонная Компания». В качестве примера можно привести вагоны-цистерны, изготовленные на ЗАО «ТихвинХимМаш» (ПАО «НПК ОВК»):

- По увеличенным габаритам строится пассажирский подвижной состав, в частности:

• электропоезда серий ЭВС1, ЭВС2 «Сапсан», ЭШ2 (Stadler KISS RUS (АЭРО), ЭС1, ЭС2Г «Ласточка» (рис. 11) по габариту T_a . Электропоезда семейства «Ласточка» широко используются не только на магистральных, но и на городских линиях, в частности Московском центральном кольце (МЦК).

Зональный габарит погрузки, который позволяет увеличить объем погрузки леса на открытый подвижной состав в пределах его грузоподъемности на 5 м³, внедрен указанием МПС № Г-3077 от 30.09.1983 г. Контрейлерный габарит погрузки утвержден приказом Минтранса от 26.07.2017 г. № 278 и находится в стадии внедрения.

Примечание. Очертание габарита по линиям 5–6–7 распространяется на подвижной состав, создаваемый после вступления в действие настоящего стандарта. При этом ширина подвижного состава в пределах точек 6–7 должна быть не более 3200 мм.

Note. Loading gauge outline along lines 5–6–7 extends to rolling stock created after the entry into force of this standard. At the same time, the width of the rolling stock within the points 6–7 should not exceed 3200 mm

снижением потребности в грузовых вагонах за счет перевозки заданного объема меньшим количеством вагонов и поездов.



© Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ), 2019 ISSN 2223 – 9731 23



Рис. 7. Полувагон габарита Т_{пр}
Fig. 7. Open car for the loading gauge Т_{пр}



Рис. 8. Цистерна габарита Т_{пр} для перевозки аммиака
Fig. 8. Tank for Т_{пр} loading gauge for ammonia transportation



Рис. 9. Цистерна габарита Т_{пр} для перевозки метанола
Fig. 9. Tank for Т_{пр} loading gauge for methanol transportation



Рис. 10. Двухуровневые пассажирские вагоны габарита Т_{пр}
Fig. 10. Double-decked passenger cars for Т_{пр} loading gauge



Рис. 11. Электропоезд «Ласточка»
Fig. 11. “Lastochka” electric train

Для ОАО «РЖД» улучшается использование основных фондов за счет повышения массы грузового поезда при указанной его длине.

Повышение производительности при перевозках в грузовых вагонах увеличенных габаритов — 8–10 %.

Сокращение потребного парка вагонов — на 15 %.

Снижение эксплуатационных расходов — 8 %.

Экономическая эффективность внедрения зонального габарита погрузки. Применение зонального габарита погрузки позволяет увеличить объем перевозимого на открытом подвижном составе леса на 5 м³, или на 3,05 т на каждый вагон.

В 2017 г. железными дорогами России перевезено на открытом подвижном составе 25 115 265 т лесных грузов с увеличением погрузки на 1 255 763 т за счет применения на 411 725 вагонах зонального габарита погрузки. Полученный при этом фактический доход составил 942,8 млн руб. (Оценка указанной в статье эффективности подвижного состава увеличенных габаритов и габаритов погрузки выполнена канд. экон. наук Г. Е. Писаревским.)

В тот же период на железных дорогах России эксплуатировалось 299 двухэтажных купейных пассажирских вагонов постройки ОАО «ТВЗ». По сравнению с типовыми купейными вагонами их вместимость увеличена до 50 пассажиров. При использовании вместимости на 80 % население вагона составляет 40 пассажиров (+11 пассажиров). С учетом маршрутов обращения этих вагонов и средней дальности поездки количество перевезенных одним вагоном пассажиров составило 7239 чел. Средняя доходность ФПК при перевозке 90 млн пассажиров и доходе 198 млрд руб. составила на 1 пассажира 2200 руб., что обеспечивает годовой экономический эффект в 673 млн руб.

С учетом снижения эксплуатационных расходов на 8 % на полувагоны достигнутый к настоящему моменту суммарный годовой экономический эффект составляет 2,205 млрд руб.

Выводы. 1. Выполненные институтом в течение полувеккового периода (середина XX — начало XXI в.) научно-методические исследования обеспечили на основе проведения габаритной классификации всех объектов инфраструктуры всей сети железных дорог и подъездных путей бывшего СССР выявление сооружений и устройств, ограничивающих применение габарита подвижного состава Т, разработку мер по их устранению в период с 1982 по 2005 г., а также переход промышленных предприятий к производству новых грузовых и пассажирских вагонов увеличенных габаритов $T_{пр}$ и T_a , разработанных институтом.

2. Созданная новая нормативная база по габаритам железнодорожного подвижного состава и приближения строений (ГОСТ 9238–2013) разработана на основе глобального обследования фактических габаритов всех сооружений и устройств инфраструктуры железных дорог колеи 1520 (1524) мм (пространства 1520).

3. ЦНИИ МПС (АО «ВНИИЖТ») выполнено научно-методическое обеспечение модернизации объектов инфраструктуры, выработавших за 100-летний период эксплуатации ресурс прочности конструкций.

4. Выполненное институтом научно-методическое обеспечение позволило создать и ввести в эксплуатацию подвижные составы с увеличенным габаритом $T_{пр}$:

- для грузовых перевозок — с повышенными на 2 т/м и более погонными нагрузками по сравнению с европейскими железными дорогами;
- для пассажирских перевозок — более комфортабельные и на 39 % более вместительные двухэтажные купейные вагоны.

5. Увеличение габаритов подвижного состава обеспечивает более высокую эффективность работы железнодорожного транспорта за счет повышения производительности выполнения перевозок, сокращения потребного парка вагонов на перевозку одинаковых объемов грузов и снижает эксплуатационные расходы. При этом достигнутый годовой суммарный экономический эффект составляет 2,205 млрд руб.

6. Внедрение контрейлерного габарита погрузки способствует организации перевозок большегрузных автомобилей железнодорожным транспортом и, следовательно, улучшению экологической ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вериги М. Ф., Богданов В. М. Основные проблемы, связанные с введением на сети железных дорог СССР габарита Т // Повышение эффективности использования габаритов приближения строений и подвижного состава железных дорог СССР: сб. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1976. Вып. 553. С. 22–29.
2. Остров А. Б., Лазаренко Ю. М. Основы классификации сооружений, устройств и путей железных дорог СССР колеи 1520 (1524) мм по габаритному признаку // Повышение эффективности

использования габаритов приближения строений и подвижного состава железных дорог: сб. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1976. Вып. 553. С. 29–49.

3. Лазаренко Ю. М., Остров А. Б. Метод определения размеров габаритов приближения строений и классов габаритной проходимости в кривых // Повышение эффективности использования габаритов приближения строений и подвижного состава железных дорог: сб. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1976. Вып. 553. С. 50–71.

4. Лазаренко Ю. М. Влияние габаритов и нагрузок от оси на рельс на массу поезда // Подвижной состав и путь в условиях интенсификации работы железных дорог: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1989. С. 30–38.

5. Современные габаритные возможности железных дорог / Ю. М. Лазаренко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1978. № 4. С. 61–66.

6. Лесным грузам — увеличенный габарит погрузки / Ю. М. Лазаренко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 1980. № 5. С. 20–23.

7. Лазаренко Ю. М., Богданов В. М. Совершенствование габаритов на железных дорогах ОСЖД // Бюллетень ОСЖД. 1980. № 4. С. 9–13.

8. Объемы работ по подготовке железных дорог и путей промышленного транспорта для применения грузовых вагонов увеличенного габарита. Требования к габаритам сооружений и междупутий при подвижном составе габарита $T_{пр}$ / А. Б. Остров [и др.] // Увеличение габаритов и повышение погонных нагрузок грузовых вагонов: сб. науч. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1983. Вып. 660. С. 17–33.

9. Лазаренко Ю. М. Нестандартные решения для нестандартных грузов // РЖД-Партнер. Специальный выпуск: Контрейлерные перевозки. 2012. С. 31.

10. Лазаренко Ю. М., Бржезовский А. М., Аршинцев Д. Н. Обеспечение безопасности железнодорожных перевозок крупногабаритного энергетического оборудования // Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 2 окт. 2018 г.). СПб., 2018. С. 48–53.

11. Лазаренко Ю. М., Морозов Э. Н., Аршинцев Д. Н. О внедрении высокоэффективной технологии двухъярусной перевозки крупнотоннажных контейнеров по железным дорогам Российской Федерации // Промышленный транспорт XXI век. 2013. № 1. С. 21–26.

12. Контрейлерный габарит погрузки, проблемы и процесс внедрения / Ю. М. Лазаренко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-31-37>.

13. Гапанович В. А. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД». Ход реализации, актуализация основных параметров, инвестиционных и инновационных приоритетов // Железнодорожный транспорт. 2007. № 7. С. 2–7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАЗАРЕНКО Юрий Михайлович,
канд. техн. наук, консультант, АО «ВНИИЖТ»

АРШИНЦЕВ Дмитрий Николаевич,
канд. техн. наук, заведующий лабораторией, АО «ВНИИЖТ»

НАЗАРОВ Олег Николаевич,
канд. техн. наук, заместитель начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД»

КИРЕЕВА Юлия Сергеевна,
главный специалист, отдел разработок новых грузовых вагонов, Департамент технической политики, ОАО «РЖД»

Статья поступила в редакцию 19.11.2018 г., принята к публикации 12.01.2019 г.

Results of comprehensive studies conducted by the Central Research Institute (VNIIZhT) and construction work of the Ministry of Railways (RZD) to increase the loading gauge of freight and passenger rolling stock on the railways of Russian Federation

Yu. M. LAZARENKO¹, D. N. ARSHINTSEV¹, O. N. NAZAROV², Yu. S. KIREEVA²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Department of Technical Policy, Joint Stock Company "Russian Railways" (TsTech, JSC "RZD"), Moscow, 107174, Russia

Abstract. The article presents the content and results of a set of studies on the scientific and methodological support for the modernization of structures and devices built according to the old loading gauge standards or its expired durability, the entire 1520 (1524) mm gauge railway network under the loading gauge standard T for rolling stock, allowing to increase axle and running loads of cars and due to this — the mass of trains, as well as solve the global problem that arose in the middle of the last century to increase the efficiency of the most important branch of Russia — railway transport. Variants of increased loading gauges were developed (T_{np} for any rolling stock, T_u for tanks, T_a — for electric rolling stock, T_6 — for passenger cars), which were included in the GOST 9238–83 "Loading gauges of railway rolling stock and structure clearance" and Ministry of railways instructions (no. TsP/4425 — for clearance of structures; no. TsV/4422 — for loading gauge of the rolling stock and no. TsD/4172 — for transportation of oversized and heavy (nonstandard) freights), as well as zonal and flatcars loading gauges. Scientific and methodological studies carried out by the institute during the half-century period (mid-XX — early XXI) identified structures and devices that limit the use of rolling stock of loading standard T, its elimination during 1982–2005, as well as transition of industrial enterprises to the production of new freight and passenger cars of increased loading standards T_{np} and T_a , developed by the Institute. This identification was made on the basis of the overall classification of all railway infrastructure and access railroads of the former USSR. New regulatory framework for railway rolling stock loading gauges and structure clearance (GOST 9238–2013) was developed based on a global survey of actual dimensions of all structures and infrastructure devices of the 1520 (1524) mm gauge railways (area 1520). Railway Research Institute of the Ministry of Railway Transport (currently, JSC "VNIIZhT") made scientific and methodological support for the modernization of infrastructure objects, exhausted its life span for the 100-year period of operation. Scientific and methodological support carried out by the Institute allowed the creation and operation of rolling stock with an increased loading gauge standard T_{np} : for freight traffic — with increased running loads by 2 ton/m or more compared to European railways; for passenger traffic — more comfortable and 39 % more spacious double-deck compartment cars. Increasing the loading gauge of the rolling stock provides increased efficiency of rail transport by increasing productivity, reducing the required fleet of cars for the transportation of equal volumes as well as operating costs. At the same time achieved annual total economic effect amounts to 2,205 billion rubles. Introduction of the flatcar loading gauge contributes to the organization of transportation of heavy trucks by rail and, therefore, improve the environmental situation.

Keywords: increased rolling stock loading gauge; double-deck compartment cars; preparation of double-decker carriage routes; structure clearance gauge; control outline of structure clearance; rolling stock loading gauge

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-19-26>

REFERENCES

1. Verigo M.F., Bogdanov V.M. *Main problems associated with the introduction of the loading gauge T on the USSR railways network*. Improving the efficiency of using the structure clearance and rolling stock loading gauge of the USSR railways. Proc. of JSC "VNIIZhT". Moscow, Transport Publ., 1976, Vol. 553, pp. 22–29.
2. Ostrov A.B., Lazarenko Yu. M. *Fundamentals of the classification of structures, devices and tracks of the USSR railways of 1520 (1524) mm gauge according to the loading gauge outlines*. Improving the ef-

ficiency of using the structure clearance and rolling stock loading gauge of railways. Proc. of JSC "VNIIZhT". Moscow, Transport Publ., 1976, Vol. 553, pp. 29–49.

3. Lazarenko Yu. M., Ostrov A. B. *Method of determining the dimensions of the structure clearance and classes of overall availability in curves*. Improving the efficiency of using the structure clearance and rolling stock loading gauge of railways. Proc. of JSC "VNIIZhT". Moscow, Transport Publ., 1976, Vol. 553, pp. 50–71.

4. Lazarenko Yu. M. *Influence of loading gauges and loads from the axle on the rail and on the mass of the train*. Rolling stock and track in conditions of intensification of the railways. Proc. of scientific papers. Moscow, Transport Publ., 1989, pp. 30–38.

5. Lazarenko Yu. M., Bogdanov V. M., Ostrov A. B., Vol'kovich Yu. N. *Modern loading gauges of the railways*. Zheleznodorozhnyy transport, 1978, no. 4, pp. 61–66.

6. Lazarenko Yu. M. *For forest products transportation — increased loading gauge*. Zheleznodorozhnyy transport, 1980, no. 5, pp. 20–23.

7. Lazarenko Yu. M., Bogdanov V. M. *Improvement of loading gauge on the OSJD railways*. Byulleten' OSZhD, 1980, no. 4, pp. 9–13.

8. Ostrov A. B. [et al.]. *Amount of work on the preparation of railways and industrial transport routes for the use of freight cars of increased size. Requirements for the structure clearances and inter-track area with rolling stock of T_{np} loading gauge standard*. Increase the loading gauge and increase the running load of freight cars. Proc. of JSC "VNIIZhT". Moscow, Transport Publ., 1983, Vol. 660, pp. 17–33.

9. Lazarenko Yu. M. *Non standard solutions for non-standard freight*. RZD-Parnter. Special issue. Piggyback transportation, 2012, p. 31.

10. Lazarenko Yu. M., Brzhezovskiy A. M., Arshintsev D. N. *Ensuring safety of rail transportation of large-sized energy equipment*. Modernization and innovative development of the fuel and energy complex. Materials of the I Intern. scientific-practical conf. (St. Petersburg, October 2, 2018). St. Petersburg, 2018, pp. 48–53.

11. Lazarenko Yu. M., Morozov E. N., Arshintsev D. N. *On the introduction of high-performance technology of double-deck transportation of large-capacity containers on the railways of the Russian Federation*. Industrial transport XXI century, 2013, no. 1, pp. 21–26.

12. Lazarenko Y. M., Arshintsev D. N., Zavertalyuk A. V., Bondarev V. N., Mitina E. A. *Piggyback loading gauge, problems and process of implementation*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-31-37>.

13. Gapanovich V. A. *Energy strategy of the JSC "RZD". Progress of implementation, updating of the main parameters, investment and innovation priorities*. Zheleznodorozhnyy transport, 2007, no. 7, pp. 2–7.

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. LAZARENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Consultant, JSC "VNIIZhT"

Dmitriy N. ARSHINTSEV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, JSC "VNIIZhT"

Oleg N. NAZAROV,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Technical policies, JSC "RZD"

Yulia S. KIREEVA,

Chief Expert, Department of new freight car development, Department of Technical policies, JSC "RZD"

Received 19.11.2018

Accepted 12.01.2019

■ E-mail: lazarenko_um@list.ru (Yu. M. Lazarenko)

Результаты эксплуатации выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока ВЛ80^Р на Красноярской железной дороге

С. А. БОГИНСКИЙ¹, В. В. СЕМЧЕНКО²

¹ Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), Москва, 105064, Россия

² Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги» (АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»), Красноярск, 660021, Россия

Аннотация. Приведены данные о неисправностях выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) электровозов переменного тока серии ВЛ80^Р, зафиксированных на пунктах технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) и локомотивных депо Красноярской железной дороги за период 2014–2018 гг. Даны сведения по количеству тиристорных, их основным параметрам и техническим характеристикам для двух типов преобразователей — ВИП-2200 и ВИП-4000. На основе мониторинга получены статистические данные по количественной и качественной оценке видов неисправностей ВИП и проведен их анализ. Приведены данные о количестве неисправных ВИП-2200 и ВИП-4000 на электровозах ВЛ80^Р за указанный период. Представлена статистика случаев отказов данных типов преобразователей, приходящихся на 1 млн локомотиво-км общего пробега электровоза ВЛ80^Р в пересчете на одну секцию, а также статистика количества сквозных пробоев плеч ВИП, приходящихся на 1 млн локомотиво-км общего пробега этих электровозов. На основе анализа статистики отказов сделаны выводы о том, что за период с 2014 по 2018 г. замена устаревших ВИП-2200 на современные ВИП-4000 обеспечила снижение общего количества неисправностей всех ВИП в 2,3 раза. Это привело к уменьшению числа случаев отказов ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега электровоза в 4 раза.

Ключевые слова: электровоз; выпрямительно-инверторный преобразователь; техническое состояние; отказ; мониторинг

Введение. Электровозы серии ВЛ80^Р [1, 2], построенные в 70–80-х гг. XX в., были самыми первыми на сети железных дорог России локомотивами переменного тока, на которых применена бесконтактная силовая схема преобразования переменного тока в постоянный. Эта схема была построена на основе выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП), плечи которых выполнены из силовых управляемых вентилей — тиристоров. С помощью такой схемы электровоз получил бесконтактное плавное регулирование выпрямленного напряжения на тяговых двигателях в режиме тяги и плавное регулирование выпрямленного напряжения инвертора в режиме рекуперативного торможения.

Этапы развития в построении ВИП по количеству тиристорных. Первые типы ВИП электровозов переменного тока [3, 4] основывались на применении тиристорных невысокого класса и небольшой величины номинального прямого тока (максимально допустимое по нагреву среднее за период значение выпрямленного тока). Это вызывало необходимость создать ВИП с большим количеством тиристорных в каждом плече, включенных последовательно и параллельно между собой [5]. В свою очередь, такое построение плеча вело к необходимости применения большого количества дополнительных элементов для выравнивания напряжения и тока между ними. Так, при последовательном соединении тиристорных используется параллельное включение шунтирующих резисторов $R_{ш}$, которые обеспечивают равномерное деление напряжения между тиристорами. Кроме того, используется параллельное включение тиристорам демпфирующих цепочек $R_d C_d$, снижающих коммутационные перенапряжения, и резисторов связи R_c , соединяющих тиристоры параллельных ветвей. Такое включение этих элементов позволяет обойтись одним комплектом $R_{ш}$ и $R_d C_d$ для нескольких параллельных тиристорных ветвей в плече. Для выравнивания токов в тиристорных ветвях, включенных параллельно, применяют индуктивные делители тока (ИД). Каждый такой делитель включен последовательно с тиристором ветви. В связи с большим количеством силовых тиристорных в плече увеличивается и количество дополнительных элементов R_c , $R_{ш}$ и $R_d C_d$, что повышает вероятность их отказов. В результате надежность работы ВИП в эксплуатации снижается [6].

На первых трех опытных электровозах серии ВЛ80^Р в ВИП применялись лавинные тиристоры ТЛ 200 с номинальным прямым током 200 А и номинальным напряжением 1000 В (10 класс по классификации ГОСТ 10662–69). В итоге ВИП, состоящий из 10 плеч, имел 280 тиристорных, которые были распределены следующим образом. Каждое плечо состояло из 28 тири-

■ E-mail: v.v.semchenko@dcv.ru (В. В. Семченко)

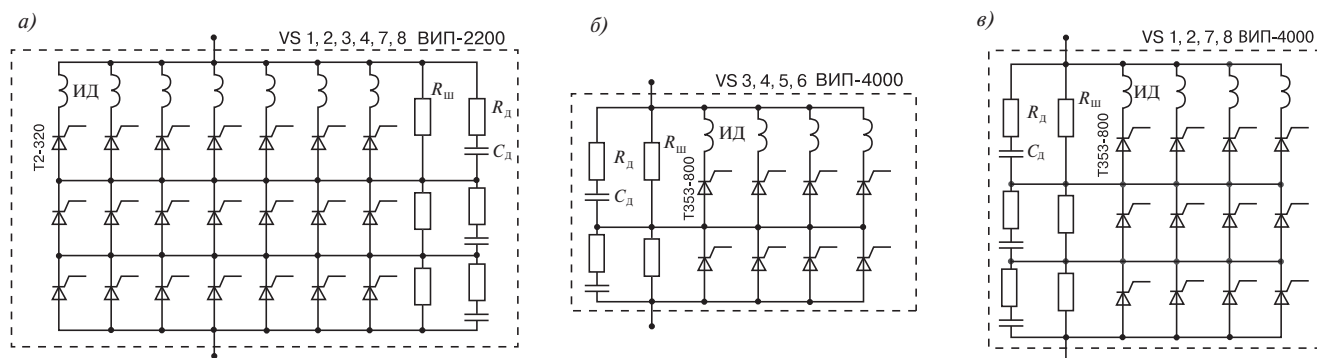


Рис. 1. Схемы одного плеча VS для ВИП-2200 и ВИП-4000 с разным количеством тиристоров в плече:

a — одно плечо VS (плечи 1, 2, 3, 4, 7, 8) ВИП-2200; *б* — одно плечо VS (плечи 3, 4, 5, 6) ВИП-4000; *в* — одно плечо VS (плечи 1, 2, 7, 8) ВИП-4000; ИД — индуктивный делитель тока; $R_{ш}$ — шунтирующий резистор; $R_{д}$ — демпфирующий резистор; $C_{д}$ — демпфирующий конденсатор; T2-320 — тип тиристора в ВИП-2200; T353-800 — тип тиристора в ВИП-4000

Fig. 1. Schemes of one shoulder VS for RC-2200 and RC-4000 with different number of semi-conductor switches in the shoulder:

a — one shoulder VS (shoulders 1, 2, 3, 4, 7, 8) RC-2200; *б* — one shoulder VS (shoulders 3, 4, 5, 6) RC-4000; *в* — one shoulder VS (shoulders 1, 2, 7, 8) RC-4000; ИД — inductive current divider; $R_{ш}$ — shunt resistor; $R_{д}$ — damping resistor; $C_{д}$ — damping capacitor; T2-320 — semi-conductor switch type in RC-2200; T353-800 — semi-conductor switch type in RC-4000

сторов, распределенных на 7 параллельных ветвей, в каждой из которых было включено последовательно 4 тиристора.

В 70-х гг. XX в. была выпущена опытная партия электровозов с ВИП из 8-ми плеч, в которых уже применялись более современные на то время тиристоры типа T2-320 с номинальным напряжением 1400 и 1500 В (14 и 15 классы) и номинальным прямым током 320 А. На рис. 1 представлены схемы одного плеча VS для ВИП-2200 и ВИП-4000 с разным количеством тиристоров в плече, а на рис. 2 показана упрощенная силовая схема электровоза переменного тока ВЛ80^Р в применении к одной тележке с двумя тяговыми двигателями. ВИП-2200 состоял из 154 тиристоров, распределенных

следующим образом. В плечах 5, 6 было включено по 14 тиристоров, распределенных на 7 параллельных ветвей, в каждой из которых было включено последовательно 2 тиристора. В плечах 1, 2, 3, 4, 7, 8 было включено по 21 тиристор, распределенных на 7 параллельных ветвей, в каждой из которых было включено последовательно 3 тиристора (см. рис. 1, *a*). Выпрямленное напряжение ВИП-2200 в номинальном режиме составляло 1250 В, а выпрямленный ток — 1760 А. В дальнейшем по мере освоения электротехнической промышленностью выпуска тиристоров более высокого класса и большего номинального прямого тока этот ВИП стали совершенствовать путем применения тиристоров типа T143-500 с номинальным напряжением 1500 В (15 класс) и номинальным прямым током 500 А. Позднее стали применять тиристоры типа T353-800 с номинальным напряжением 2800 В (28 класс) и номинальным прямым током 800 А. Преобразователь получил наименование ВИП-4000. Этот ВИП содержал уже 80 тиристоров, которые были распределены следующим образом. В плечах 3, 4, 5, 6 было включено по 8 тиристоров, распределенных на 4 параллельных ветви, в каждой из которых было включено последовательно 2 тиристора (см. рис. 1, *б*). В плечах 1, 2, 7, 8 было включено по 12 тиристоров, распределенных на 4 параллельных ветви, в каждой из которых было включено последовательно 3 тиристора (см. рис. 1, *в*). Надежность ВИП-4000 в эксплуатации повысилась. У этого преобразователя выпрямленное напряжение в номинальном режиме составляет 1350 В, а выпрямленный ток — 3000 А.

Эксплуатация электровозов ВЛ80^Р с ВИП-2200 и ВИП-4000. Эксплуатация электровозов ВЛ80^Р осуществляется в основном на Восточном полигоне сети железных дорог (Красноярская, Восточно-Сибирская и Забайкальская дороги). Из многочисленного перечня электрооборудования электровоза особым явля-

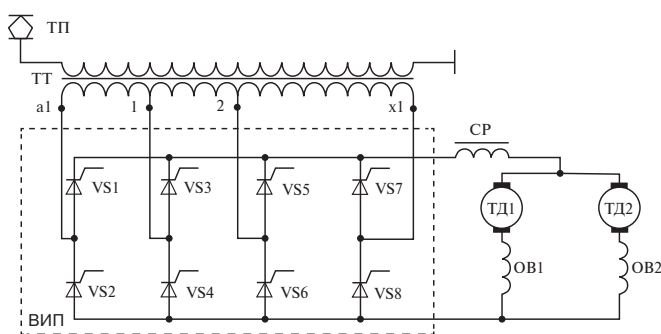


Рис. 2. Упрощенная силовая схема электровоза переменного тока ВЛ80^Р в применении к одной тележке с двумя тяговыми двигателями:

ТП — токовый приемник; ТТ — тяговый трансформатор; а1, 1, 2, x1 — выходы вторичной обмотки ТТ; ВИП — выпрямительно-инверторный преобразователь; VS1...VS8 — тиристорные плечи ВИП; CP — сглаживающий реактор; ТД1, ТД2 — тяговые двигатели; ОВ1, ОВ2 — обмотки возбуждения ТД

Fig. 2. Simplified power circuit of AC VL80^R electric locomotive as applied to a single bogie with two traction motors:

ТП — current receiver; ТТ — traction transformer; а1, 1, 2, x1 — outputs of the secondary winding of the ТТ; RC — reversible converter; VS1...VS8 — semi-conductor switch shoulders RC; CP — smoothing reactor; ТД1, ТД2 — traction motors; ОВ1, ОВ2 — excitation windings of ТД

ется ВИП, от которого в большей степени зависит исправное состояние локомотива. В этой связи обеспечение надежной работы ВИП в эксплуатации повышает эксплуатационную надежность работы электровоза и создает условия для безотказной работы локомотива вплоть до его капитального ремонта. Безусловно, по мере эксплуатации этих локомотивов происходит старение и износ материалов их электрического оборудования. Так, в ВИП старению и износу подвергаются изоляция, полупроводниковый материал силовых вентилях, элементов управления системы формирования импульсов (СФИ) — выходных усилителей и других составляющих ВИП, что приводит к возникновению в нем неисправности, а следовательно — к отказу работы электровоза.

Таким образом, целью данной статьи является исследование путей повышения эксплуатационной надежности работы ВИП с сохранением срока службы до его капитального ремонта. Поставленная цель достигается за счет применения мониторинга технического состояния элементов ВИП в процессе его работы и технического диагностирования работы устройства с его системой управления [7] при плановых ремонтах и в процессе технического обслуживания (ТО). Техническое диагностирование позволяет в ходе выполнения ТО и ремонтных работ выявить и устранить отклонения параметров, повреждения элементов ВИП в полном объеме и тем самым повысить качество ТО и ремонта. В результате уровень эксплуатационной надежности работы ВИП повышается.

Опыт эксплуатации электровозов ВЛ80^Р на железных дорогах Восточного полигона [8] выявил необходимость перехода от системы ТО и ремонта по пробегу к системе [9], которая учитывает фактическое техническое состояние ВИП и его электронной аппаратуры управления (БУВИП, БАУ, МСУД и МСУЭ). За годы эксплуатации электровозов ВЛ80^Р в ряде локомотивных депо (Боготол, Абакан, Иланская, Нижнеудинск, Иркутск, Смоляниново) была внедрена автоматизированная система технической диагностики (АСТД) [10]. Эта система диагностирует правильность выполнения алгоритма управления работой плеч ВИП, исправность или отказ работы его элементов и системы управления.

Помимо технического диагностирования целесообразно проводить мониторинг текущего технического состояния работы ВИП и его системы управления [11, 12, 13, 14]. Система комплексного мониторинга позволяет выявлять предотказные состояния узлов и устройств электровозов, включая ВИП, а также по данным о поездной работе фиксировать наличие фактов нарушения эксплуатации локомотивов [12, 13]. Реализованная в настоящее время на Красноярской дороге система комплексного мониторинга текущего технического состояния работы ВИП и его системы управления [14] обеспечивает обратную связь между эксплуатацией,

ТО и ремонтом ВИП при выполнении полного ремонта и ТО электровозов переменного тока типа ВЛ80^Р, ВЛ85, 2(3)ЭС5К и других серий.

Надежность работы ВИП можно будет также повысить выполнением норм его ТО, своевременным проведением ремонта соответствующего качества и внедрением системы мониторинга технического состояния электровоза.

В процессе эксплуатации могут возникать аварийные режимы работы электровоза. В связи с этим микропроцессорная система управления движением (МСУД) электровоза предусматривает управление быстродействующей защитой электрического и электронного оборудования [15]. Для обеспечения такой защиты в настоящее время разработаны соответствующие алгоритмы управления [16].

Одним из существенных путей повышения надежности работы электровоза является замена устаревших ВИП-2200, срок службы которых давно уже истек (15 лет), на новые ВИП-4000, оснащенные более современными тиристорами типа Т353-800 32 класса, рассчитанные на токи 800 А. Надо иметь в виду, что с 1986 г. производство ВИП-2200 прекращено. В преобразователе ВИП-4000 за счет более высоких технических параметров тиристорov значительно сократилось их количество по сравнению с ВИП-2200 (с 154 до 80). Использование тиристорov типа Т353-800 позволило увеличить мощность преобразователя в 1,8 раза и повысить надежность его работы. Это дало возможность применить на электровозах более мощные тяговые двигатели НБ-514 (взамен НБ-418К6). В табл. 1 показано, что количество преобразователей ВИП-2200 на электровозах ВЛ80^Р уменьшилось за период с 2014 по 2018 г. на 165 ед., а ВИП-4000 увеличилось на 277 ед.

Анализ статистики неисправностей ВИП-2200 и ВИП-4000. Частичная замена на электровозах ВЛ80^Р ВИП-2200, которые имеют большое количество тиристорov и дополнительных элементов, на ВИП-4000 значительно снизила общее количество отказов ВИП. Кроме этого, на уменьшение количества отказов ВИП повлиял ряд проведенных организационных и технических мероприятий, таких как контроль за выполнением норм ТО, совершенствование системы ТО и ремонта, оснащение ПТОЛ и локомотивных депо более современной измерительной и диагностической аппаратурой, а также введение в 2014 г. системы мониторинга технического состояния электровозов.

На Красноярской железной дороге была собрана статистика количества всех неисправных ВИП электровозов ВЛ80^Р в период 2014–2018 гг., результаты которой представлены в табл. 2. Данные таблицы показывают, что количество всех неисправных ВИП электровозов ВЛ80^Р за рассматриваемый период значительно (более чем в 3 раза) сократилось.

Таблица 1

**Изменение количества ВИП-2200 и ВИП-4000
за период 2014–2018 гг.**

Table 1

**The change in the number of RC-2200 and RC-4000
for the period 2014–2018**

Тип ВИП	Количество ВИП на электровозах ВЛ80 ^Р , ед.				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
ВИП-2200	402	372	315	272	237
ВИП-4000	149	207	229	353	426

Таблица 2

**Количество неисправных ВИП на электровозах ВЛ80^Р
за период 2014–2018 гг.**

Table 2

**Number of faulty RCs on VL80^R electric locomotives
for the period 2014–2018**

Количество неисправных ВИП, ед.				
2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
375	326	279	170	112

Таблица 3

**Количество отказов электровозов ВЛ80^Р по причине неисправности
ВИП-2200 и ВИП-4000 на 1 млн локомотиво-км общего пробега
в пересчете на одну секцию за период 2014–2018 гг.**

Table 3

**Number of failures of electric locomotives VL80^R due to failures
of the RC-2200 and RC-4000 per million locomotive-km of total mileage
in terms of one section for the period 2014–2018**

Тип ВИП	Количество отказов электровозов с неисправными ВИП-2200 и ВИП-4000 на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
ВИП-2200	0,65	0,62	0,50	0,42	0,29
ВИП-4000	0,75	0,47	0,24	0,16	0,10

Таблица 4

**Количество отказов электровозов ВЛ80^Р по причине
неисправности ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега
в пересчете на одну секцию за период 2014–2018 гг.**

Table 4

**Number of failures of electric locomotives VL80^R due to failures
of the RC per million locomotive-km of total mileage in terms of one section
for the period 2014–2018**

Количество отказов электровозов по причине неисправности ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию				
2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
0,68	0,56	0,37	0,27	0,17

Таблица 5

**Количество сквозных пробоев плеч в ВИП-2200 и ВИП-4000
электровозов ВЛ80^Р за период 2014–2018 гг.**

Table 5

**Number of reach-through shoulder breakdowns in RC-2200 and RC-4000
of VL80^R electric locomotives for the period 2014–2018**

Тип ВИП	Количество сквозных пробоев плеч ВИП				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
ВИП-2200	106	87	58	36	26
ВИП-4000	34	28	21	6	15

Кроме того, была собрана статистика неисправностей ВИП обоих типов в виде числа случаев отказов работы электровозов ВЛ80^Р по причине неисправности ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию электровоза за период 2014–2018 гг. (табл. 3). Данные таблицы показывают, что количество отказов электровозов по причине неисправности ВИП-4000 на 1 млн локомотиво-км общего пробега за рассматриваемый период сократилось значительно (в 7,5 раза), а количество отказов электровозов с неисправными ВИП-2200 только в 2,2 раза.

В табл. 4 собрана статистика неисправностей всех ВИП в виде числа случаев отказов работы электровозов ВЛ80^Р по причине неисправности ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию электровоза за период 2014–2018 гг. Данные таблицы показывают, что количество отказов электровозов по причине неисправности ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега за рассматриваемый период значительно (в 4 раза) сократилось.

Одной из тяжелых по последствиям неисправностей ВИП является сквозной пробой его плеча по причине перегрузки тиристорных по току, неравномерного распределения тока по параллельным ветвям в плече, накопления пробитых вентилях. Результатом сквозного пробоя плеча ВИП будет возникновение тока короткого замыкания с последующей вероятностью повреждения обмоток тягового трансформатора и его возгорания. В табл. 5 представлено количество сквозных пробоев плеч ВИП обоих типов электровозов ВЛ80^Р за период 2014–2018 гг. Данные таблицы показывают, что количество сквозных пробоев плеч ВИП-2200 за рассматриваемый период сократилось в 4 раза, а для ВИП-4000 в 2,3 раза.

Статистические данные о количестве отказов электровозов по причине сквозного пробоя плеч ВИП обоих типов на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию электровоза за период 2014–2018 гг. представлены в табл. 6. Данные таблицы показывают, что количество отказов электровозов по причине сквозных пробоев плеч ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию за рассматриваемый период для ВИП-2200 сократилось в 2,4 раза, а для ВИП-4000 в 5,75 раза.

Анализ статистики неисправностей ВИП-2200 и ВИП-4000 показал, что за период 2014–2018 гг. количество неисправных ВИП обоих типов уменьшилось, что привело к снижению количества отказов электровозов по причине неисправных ВИП, в том числе и по причине сквозных пробоев плеч ВИП, на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию. Причем для ВИП-4000 это уменьшение произошло в значительно большей мере (5,75 раза), чем для ВИП-2200 (2,4 раза).

Таблица 6

Количество отказов электровозов ВЛ80^Р по причине сквозных пробоев плеч ВИП-2200 и ВИП-4000 на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию за период 2014–2018 гг.

Table 6

Number of failures of electric locomotives VL80^R due to the reach-through breakdown of shoulders RC-2200 and RC-4000 per million locomotive-km of total mileage in terms of one section for the period 2014–2018

Тип ВИП	Количество отказов электровозов по причине сквозных пробоев плеч ВИП на 1 млн локомотиво-км общего пробега в пересчете на одну секцию				
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
ВИП-2200	0,26	0,23	0,18	0,13	0,11
ВИП-4000	0,23	0,14	0,07	0,05	0,04

Закключение. Проведенное исследование статистических данных работы ВИП-2200 и ВИП-4000 электровозов ВЛ80^Р на Красноярской железной дороге позволяет сделать следующие выводы:

1. Количество неисправных ВИП за период 2014–2018 гг. по причине опасных сквозных пробоев плеч существенно уменьшилось, что привело к значительному сокращению количества отказов электровозов по причине этой неисправности. Для ВИП-4000 — в 5,75 раза, а для ВИП-2200 — в 2,4 раза.

2. Значительное уменьшение количества отказов электровозов с ВИП-4000 по причине неисправных ВИП связано с тем, что ВИП-4000 являются более современными и содержат значительно меньшее количество тиристорных и дополнительных элементов, что увеличивает надежность их работы.

3. На уменьшение количества неисправных ВИП обоих типов повлияло то, что в период 2014–2018 гг. ДЦВ Красноярской железной дороги на всем протяжении Восточного полигона железных дорог организовал пункты технического обслуживания электронного оборудования электровозов (ВИП и его система управления), в которых осуществляется мониторинг технического состояния ВИП и его диагностика.

4. Тиристоры в ВИП-4000 имеют более высокие параметры по току и напряжению, что создает для ВИП большой запас надежности по этим характеристикам. Несмотря на существенные финансовые затраты на приобретение новых тиристорных, замена ВИП-2200 на ВИП-4000 является оправданной для повышения эксплуатационной надежности ВИП, а значит, и электровоза ВЛ80^Р. Значительное снижение количества неисправных ВИП существенно сократит эксплуатационные затраты на электровозы ВЛ80^Р и окупит затраты на приобретение новых ВИП-4000.

5. Для повышения надежности эксплуатационной работы электровозов ВЛ80^Р с ВИП-2200 на Восточном полигоне железных дорог при проведении капитального ремонта ВИП необходимо провести полную их модернизацию, включая замену тиристорных на более современные (32 класс, номинальный прямой ток 800 А), что позволит сократить их количество до 64 шт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капустин Л.Д., Копанев А.С., Лозановский А.Л. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80^Р. М.: Транспорт, 1979. 175 с.
- Электровоз ВЛ80^Р: руководство по эксплуатации / под ред. Б.А. Тушканова. М.: Транспорт, 1985. 541 с.
- Голованов В.А., Капустин Л.Д., Хомяков Б.И. Эксплуатация силовых преобразователей электроподвижного состава. М.: Транспорт, 1979. 207 с.
- Капустин Л.Д. Эффективность эксплуатации электровозов переменного тока с рекуперативным торможением на тиристорных преобразователях // Электроподвижной состав с полупроводниковыми преобразователями: сб. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1972. Вып. 478. С. 22–33.
- Режимы работы магистральных электровозов / О.А. Некрасов [и др.]. М.: Транспорт, 1983. 231 с.
- Капустин Л.Д., Каменев А.С., Лозановский А.Л. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80^Р в эксплуатации. М.: Транспорт, 1986. 246 с.
- Горбань В.Н., Донской А.Л., Шабалин Н.Г. Электронное оборудование электровоза ВЛ80^Р, ремонт и техническое обслуживание. М.: Транспорт, 1984. 183 с.
- Семченко В.В., Мальцев Е.А., Лакин И.К. Анализ режимов эксплуатации электровозов серии ВЛ80^Р // Локомотив. 2015. № 11. С. 40–41.
- Техническое диагностирование электронного оборудования электровозов переменного тока / А.В. Горленко [и др.]. М.: Транспорт, 1992. 112 с.
- Зайцев В.К., Алексеев А.Г. Стационарное диагностическое устройство для блока управления электровоза ВЛ80^Р // Труды ВНИИЖТ. 1982. Вып. 650. С. 97–104.
- Хромов И.Ю., Баркунова А.А., Никишкина Е.А. Мониторинг режимов эксплуатации локомотивов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: сб. материалов Третьей Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 11–12 окт. 2018 г.). М.: Локомотивные технологии, 2018. С. 391–395.
- Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис. Теория и практика / [К.В. Липа и др.; общ. ред. И.К. Лакин]. М.: Локомотивные технологии, 2015. 212 с.
- Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М.: МИИТ, 2016. 195 с.
- Семченко В.В., Лакин И.К., Мальцев Е.А. Опыт внедрения и результаты работы системы мониторинга технического состояния и режимов работы электровозов ВЛ80^Р // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: сб. материалов Третьей Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 11–12 окт. 2018 г.). М.: Локомотивные технологии, 2018. С. 345–350.
- Мельников В.А., Аболмасов А.А., Лакин И.И. Алгоритмическая защита локомотивов // Локомотив. 2015. № 3. С. 8–10.
- Богинский С.А. О необходимости разработки новых алгоритмов управления для МСУ локомотивов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: сб. материалов Третьей Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 11–12 окт. 2018 г.). М.: Локомотивные технологии, 2018. С. 126–129.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БОГИНСКИЙ Сергей Антонович,
заместитель начальника дирекции (по планированию и контролю ремонта локомотивов), Дирекция тяги — филиал ОАО «РЖД»

СЕМЧЕНКО Виктор Васильевич,
генеральный директор АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»

Статья поступила в редакцию 21.02.2019 г., принята к публикации 25.03.2019 г.

Operation results of reversible converters of AC electric locomotives VL80^R on the Krasnoyarskaya Railway

S. A. BOGINSKIY¹, V. V. SEMCHENKO²

¹ Joint Stock Company "Russian Railways" (JSC "RZD"), Moscow, 105064, Russia

² Joint-Stock Company "Road Center for the Implementation of the Krasnoyarsk Railway" (JSC "DCV of the Krasnoyarskaya Railway"), Krasnoyarsk, 660021, Russia

Abstract. The article presents information about faults of reversible converters (RC) of AC electric locomotives of the VL80^R series, fixed at the maintenance points of locomotives and locomotive depots of the Krasnoyarskaya Railway for the period 2014–2018. Authors provide data on the number of semi-conductor switches, their main parameters and technical characteristics for two types of converters — RC-2200 and RC-4000 operating on VL80^R electric locomotives. Their influence on the RC construction scheme is shown. Revealed the causes of failures of the RC in the operation of electric locomotives. The role of maintenance of RC in electric locomotive and its monitoring system in ensuring reliable operation is shown as well as the statistical data on the quantitative and qualitative assessment of the types of failures of the RC. The article also shows statistics of changes in the number of converters of each type during the operation of electric locomotives. Information is given on the number of all faulty RCs on VL80^R electric locomotives and an analysis of faulty RC-2200 and RC-4000s for a specified time period. The data is presented on the number of RC-2200 and RC-4000 failures per million km of the VL80^R electric locomotive in terms of one section. Authors carried out analysis of statistics of this type of failure of the RC with reach-through breakdown of the shoulder. Information is given on the number of RCs with the reach-through breakdown of RC shoulders per million km of VL80^R electric locomotives. It was concluded that for the period from 2014 to 2018, the number of failing RCs due to dangerous shoulder punctures decreased significantly, which led to a significant reduction in the number of failures of electric locomotives due to this failure. So, for RC-4000 this decrease occurred 5.75 times, and for RC-2200 2.4 times. In addition, the reason for a more significant reduction in the number of failures of electric locomotives with RC-4000 due to its faulty, is that RC-4000 is more modern and contains much fewer semi-conductor switches and additional elements. This increases the reliability of the RC. Thus, the replacement of obsolete RC-2200 with modern RC-4000 provided a reduction in the total number of faults of all RC in 2.3 times; decrease in the number of cases of RC failures per million km of a locomotive in 4 times.

Keywords: electric locomotive; reversible converter; technical condition; failure; monitoring

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-27-32>

REFERENCES

1. Kapustin L. D., Kopanov A. S., Lozanovskiy A. L. *Features of the design and operation of the VL80^R electric locomotive*. Moscow, Transport Publ., 1979, 175 p.
2. Tushkanov B. A. *VL80^R electric locomotive. Instruction manual*. Moscow, Transport Publ., 1985, 541 p.
3. Golovanov V. A., Kapustin L. D., Khomyakov B. I. *Operation of power converters for electric rolling stock*. Moscow, Transport Publ., 1979, 207 p.
4. Kapustin L. D. *Operating efficiency of AC electric locomotives with regenerative braking on thyristor converters*. Electric rolling stock with semiconductor converters. Coll. of works of the JSC "VNIIZhT". Moscow, Transport Publ., 1972, no. 478, pp. 22–33.

5. Nekrasov O. A., Lisitsin A. L., Muginshteyn L. A., Rakhmanov V. I. *Operation modes of main line locomotives*. Moscow, Transport Publ., 1983, 231 p.

6. Kapustin L. D., Kamenev A. S., Lozanovskiy A. L. *Reliability and efficiency of VL80^R electric locomotives in operation*. Moscow, Transport Publ., 1986, 246 p.

7. Gorban' V. N., Donskoy A. L., Shabalin N. G. *Electronic equipment of VL80^R locomotive, repair and maintenance*. Moscow, Transport Publ., 1984, 183 p.

8. Semchenko V. V., Mal'tsev E. A., Lakin I. K. *Analysis of operating modes of VL80^R series electric locomotives*. Lokomotiv [Locomotive], 2015, no. 11, pp. 40–41.

9. Gorlenko A. V., Donskoy A. L., Lakin I. K., Shabalin N. G. *Technical diagnosis of electronic equipment for AC electric locomotives*. Moscow, Transport Publ., 1992, 112 p.

10. Zaytsev V. K., Alekseev A. G. *Stationary diagnostic device for VL80^R electric locomotive control unit*. Proc. of the JSC "VNIIZhT", 1982, no. 650, pp. 97–104.

11. Khromov I. Yu., Barkunova A. A., Nikishkina E. A. *Monitoring of operation modes of locomotives*. Prospects for the development of service maintenance of locomotives. Coll. of materials of the Third International Scientific and Practical Conference (Moscow, October 11–12, 2018). Moscow, Lokomotivnye tekhnologii Publ., 2018, pp. 391–395.

12. Lipa K. V., Belinskiy A. A., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L., Lakin I. K. [et al.]. *Monitoring of the technical condition and operating modes of locomotives in TMKh-Service. Theory and practice*. Moscow, Lokomotivnye tekhnologii Publ., 2015, 212 p.

13. Lakin I. I. *Monitoring of the technical condition of locomotives according to onboard hardware-software systems*. Dis. cand. tech. sci. Moscow, MIIT Publ., 2016, 195 p.

14. Semchenko V. V., Lakin I. K., Mal'tsev E. A. *Experience of implementation and the results of the operation of monitoring system of technical condition and operating modes of VL80^R electric locomotives*. Prospects for the development of servicing locomotives. Coll. of materials of the Third International Scientific and Practical Conference (Moscow, October 11–12, 2018). Moscow, Lokomotivnye tekhnologii Publ., 2018, pp. 345–350.

15. Mel'nikov V. A., Abolmasov A. A., Lakin I. I. *Algorithmic protection of locomotives*. Lokomotiv [Locomotive], 2015, no. 3, pp. 8–10.

16. Boginskiy S. A. *On the need to develop new control algorithms for LSGs of locomotives*. Prospects for the development of servicing locomotives. Coll. of materials of the Third International Scientific and Practical Conference (Moscow, October 11–12, 2018). Moscow, Lokomotivnye tekhnologii Publ., 2018, pp. 126–129.

ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. BOGINSKIY,

Deputy Head of Directorate for planning and control of locomotive repair, Directorate of traction — branch of the JSC "RZD"

Viktor V. SEMCHENKO,

General Director of the JSC "DCV of the Krasnoyarskaya Railway"

Received 21.02.2019

Accepted 25.03.2019

■ E-mail: v.v.semchenko@dcv.ru (V. V. Semchenko)

Методология расчета финансового результата для владельца инфраструктуры от повышения провозной способности направления при перевозках в вагонах повышенной грузоподъемности

О. Ф. МИРОШНИЧЕНКО, А. Е. ОГИНСКАЯ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Предложена методология расчета финансового результата для владельца инфраструктуры от повышения провозной способности направления при перевозках в вагонах повышенной грузоподъемности.

Обоснована необходимость учета технико-технологических и экономических условий эксплуатации конкретного направления, особенно изменения технологии обслуживания тяговых плеч при увеличении массы поезда при внедрении оцениваемой технологии.

Выполнены варианты расчетов, результаты которых показали, что увеличение провозной способности участка за счет повышения массы поезда, сформированного из вагонов с повышенной нагрузкой на ось, не всегда дает положительный эффект в стоимостном выражении для владельца инфраструктуры.

Формализованы условия формирования положительного финансового результата для владельца инфраструктуры от увеличения провозной способности в результате внедрения грузовых вагонов с нагрузкой на ось 27 т.

Ключевые слова: финансовый результат; провозная способность; масса поезда; грузовые вагоны с нагрузкой на ось 27 т; затраты локомотивного комплекса

Введение. В соответствии с Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 г. [1] основным драйвером роста грузооборота в рассматриваемой перспективе будет дальнейшее наращивание перевозок каменного угля. Оно произойдет как за счет роста добычи угля в Кузбассе, так и благодаря развитию новых угольных месторождений (прежде всего, Элегестского, Эльгинского, Денисовского, Ургальского и Чумканского).

За период до 2025 г. на железнодорожном транспорте прогнозируется прирост погрузки угля на 4–5 % ежегодно. В этих условиях возникает необходимость повышения мощности транспортного комплекса, особенно пропускной и провозной способностей* [1, 2] Восточного полигона. (*Справочно: максимальное число поездов (пар поездов), которое может быть пропущено по железнодорожному участку в сутки в зависимости от его технической оснащенности, мощ-

ности тяговых средств, типа графика движения и технологии организации движения поездов считается *пропускной способностью* этого железнодорожного участка [3]. Количество миллионов тонн груза, которое может быть перевезено по железнодорожному участку за год при заданном числе пассажирских поездов (определяется по направлению следования преобладающего грузопотока), считается *провозной способностью* этого железнодорожного участка [3].)

Существенное влияние на увеличение провозной способности направления без инвестиций в развитие его пропускной способности оказывает эксплуатация вагонов повышенной грузоподъемности.

Финансовый результат [4, 5] (чистый дисконтированный доход) для владельца инфраструктуры [6, 7] от увеличения провозной способности направления следует рассматривать во взаимосвязи с изменением технологии обслуживания тяговых плеч и с соответствующим изменением затрат локомотивного комплекса, что определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^T \frac{\pm \Delta E_{Ti} - \Delta I_{Ti} + (1 - \gamma) \Pi_{\text{доп } i}}{(1 + R)^i}, \text{ млн руб.}, \quad (1)$$

где i — номер шага расчета — год расчетного периода ($i = 1, 2, \dots, T$); T — продолжительность расчетного периода, лет; ΔE_{Ti} — изменение текущих затрат по обеспечению тягой поездов, сформированных из вагонов с повышенной нагрузкой на ось, на расчетном участке (при экономии «+», при дополнительных затратах «–»), млн руб.; ΔI_{Ti} — дополнительные инвестиционные затраты [8] владельца инфраструктуры на локомотивный парк при организации движения поездов, сформированных из вагонов с повышенной нагрузкой на ось, на расчетном участке, млн руб.; γ — доля налоговых отчислений от прибыли [9]; $\Pi_{\text{доп } i}$ — дополнительный финансовый результат (прибыль) от повышения провозной способности на направлении с высоким коэффициентом заполнения

■ E-mail: Oginskaya.Ann@vniizht.ru (А. Е. Огинская)

пропускной способности при потребности освоения дополнительных объемов перевозок, млн руб.; R — норма дисконта [10].

Порядок расчета дополнительного финансового результата (прибыли) от повышения провозной способности участка (направления). Для увеличения объема перевозок на участках с недостатком пропускной способности появляется возможность повысить провозную способность за счет увеличения массы поездов, сформированных из вагонов с более высокой нагрузкой на ось (например, с нагрузкой на ось 27 т), при неизменной унифицированной длине поезда. При увеличении провозной способности без инвестиций в развитие пропускной способности направления можно получить дополнительный финансовый результат (прибыль) $\Pi_{\text{доп}}$, который определяется с учетом [11] при выполнении следующих условий:

- в расчетном периоде требуется увеличение провозной способности на направлении для освоения заданного объема перевозок, т. е.

$$\Gamma_i \leq \Gamma_{\text{потр } i},$$

где Γ_i — провозная способность железнодорожного участка в i -ом году расчетного периода (вычисляется в соответствии с п. 63 [3]), млн т; $\Gamma_{\text{потр } i}$ — потребная провозная способность железнодорожного участка в i -ом году расчетного периода, млн т (вычисляется в соответствии с п. 70 [3]);

- в расчетном периоде коэффициент заполнения пропускной способности расчетного участка превышает допустимые значения (на двухпутных линиях — 0,99, на однопутных — 0,98, в соответствии с п. 6.4 [12]).

Дополнительный финансовый результат (прибыль) в i -ом году определяется по формуле

$$\Pi_{\text{доп } i} = (d_{\text{гр } i} - C_{\text{гр } i} \gamma_{\text{зав}}) \Delta P_{\text{гр } i} l_{\text{уч}} 10^{-3}, \text{ млн руб.}, \quad (2)$$

где $d_{\text{гр } i}$ — доходная ставка с учетом дальности перевозки и рода груза, определяемого для дополнительного объема, коп./10 т-км; $C_{\text{гр } i}$ — базовая себестоимость грузовых перевозок на рассматриваемом перегоне, коп./10 т-км; $\gamma_{\text{зав}}$ — доля зависящих от объема перевозок расходов в грузовом движении; $\Delta P_{\text{гр } i}$ — дополнительный объем груза, принятый к расчету эффекта от увеличения провозной способности на расчетном направлении в результате внедрения оцениваемого варианта организации движения поездов (в вагонах повышенной грузоподъемности), по годам расчетного периода, млн т/год; $l_{\text{уч}}$ — протяженность расчетного участка (направления), км.

Дополнительный объем груза ($\Delta P_{\text{гр } i}$) в i -ом году определяется формулой

$$\Delta P_{\text{гр } i} = \begin{cases} \Delta P_{\text{гр max } i}, & \Delta P_{\text{гр max } i} \leq (\Gamma_{\text{потр } i} - \Gamma_i); \\ (\Gamma_{\text{потр } i} - \Gamma_i), & \Delta P_{\text{гр max } i} > (\Gamma_{\text{потр } i} - \Gamma_i), \end{cases} \quad (3)$$

где $\Delta P_{\text{гр max } i}$ — максимальный дополнительный объем груза, который можно перевезти при формировании поездов повышенной массы из вагонов с нагрузкой на ось 27 т без увеличения количества поездов на участке, рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{гр max } i} = Q_{6 \text{ н } i} (N_{6 i}^{\text{гр}} - N_{\text{ос } i}^{\text{гр}}), \quad (4)$$

где $Q_{6 \text{ н } i}$ — масса поезда нетто в базовом варианте, т; $N_{6 i}^{\text{гр}}$, $N_{\text{ос } i}^{\text{гр}}$ — количество поездов, необходимое для перевозок одного и того же заданного объема груза на расчетном участке в i -ом году соответственно по базовой и оцениваемой технологии.

Оценка эффекта для владельца инфраструктуры при организации движения поездов, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т, осуществляется на основе сопоставления финансовых результатов от организации перевозки на расчетном участке по двум вариантам:

- базовый вариант — перевозка, осуществляемая в грузовых поездах, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось до 25 т включительно;
- оцениваемый вариант — перевозка, осуществляемая в грузовых поездах, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т.

Повышение нормы массы поезда требует изменения технологии обслуживания тяговых плеч на рассматриваемом участке, а также проведения тягово-энергетических испытаний с определением схемы тягового обеспечения и условий пропуска поездов повышенной массы (например, с вагонами с нагрузкой на ось 27 т без изменения унифицированной длины поезда в условных вагонах). Повышение массы поездов может привести к изменению серии локомотивов, количества секций, приходящихся на один состав, а также пробега, измеряемого в секциях-километрах в расчете на одинаковый объем перевезенного груза, и, следовательно, к изменению соответствующих затрат Дирекции тяги ОАО «РЖД». Это изменение затрат (возможны как дополнительные затраты, так и их экономия) необходимо рассматривать во взаимосвязи с эффектом от повышения провозной способности в результате увеличения массы при формировании поездов из вагонов повышенной грузоподъемности.

Порядок расчета изменения затрат на обеспечение тягой поездов увеличенной массы, сформированных из вагонов с повышенной осевой нагрузкой, на конкретном участке (направлении). Расчет изменения затрат по обеспечению тягой поездов, сформированных из вагонов с повышенной нагрузкой на ось (например, 27 т), при

увеличении массы поезда на рассматриваемом участке выполняется с учетом:

- методики расчета экономической эффективности тяжеловесного движения в структуре локомотивного комплекса [13];
- комплексной методики оценки технологической и экономической эффективности тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов на железнодорожных линиях, учитывающей их влияние на стоимость жизненного цикла объектов инфраструктуры и тягового подвижного состава [11].

Изменение затрат на тягу поездов определяется на основе сопоставления оцениваемого варианта с базовым по стоимостным показателям, связанным с изменением технологии обслуживания тяговых плеч. При замещении поездов унифицированной массы поездами повышенной массы для освоения заданного объема перевозок грузов требуется применение более мощных локомотивов, состоящих из большего количества секций, что приводит к изменению секций-километров пробега и потребного парка локомотивов.

Изменение текущих затрат [14] на обеспечение тягой поездов, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т (ΔE_{Ti}), на конкретном направлении в i -ом году рассчитывается по формуле

$$\Delta E_{Ti} = (\Delta E_{TOi} + \Delta E_{AOi} + \Delta E_{налог\ i}) k_{гр+пор} + \Delta E_{бр\ i}^{полт} + \Delta E_{ман\ i}^{пм}, \text{ млн руб.}, \quad (5)$$

где ΔE_{TOi} — изменение затрат на сервисное обслуживание (техническое обслуживание и ремонты) локомотивов в зависимости от изменения пробега (секц.-км) и используемых серий локомотивов по вариантам, млн руб.; ΔE_{AOi} — изменение затрат на амортизационные отчисления при изменении используемых серий локомотивов и их пробега (секц.-км) по вариантам, млн руб.; $\Delta E_{налог\ i}$ — изменение затрат на налог на движимое имущество в связи с изменением инвентарного парка локомотивов, определяется как средняя величина остаточной стоимости одной секции локомотива j -й серии инвентарного парка на начало и конец отчетного периода, умноженная на ставку налога на имущество в соответствии с действующим законодательством по налогам соответствующего региона (п. 1 ст. 381.1 [9]), млн руб.; $k_{гр+пор}$ — коэффициент, учитывающий затраты, связанные с порожним пробегом, принимается равным 2; $\Delta E_{бр\ i}^{полт}$ — изменение затрат на оплату труда локомотивных бригад, работающих в подталкивающих локомотивах, в год, определяется в соответствии с [15], млн руб.; $\Delta E_{ман\ i}^{пм}$ — изменение затрат, связанное с проведением маневровой работы по изменению массы транзитного состава (на станциях перелома массы), млн руб.

При оценке изменения затрат на организацию движения поездов на направлении, включающем участки с различными унифицированными нормами масс, видами тяги и сериями локомотивов, расходы определяются суммированием полученных значений для каждого участка, входящего в расчетный участок (маршрут следования поезда).

Изменение затрат на сервисное обслуживание в зависимости от изменения пробега (секц.-км) в i -ом году определяется как

$$\Delta E_{TOi} = \left(\sum_{j=1}^k n_{6\ ji}^{секц} N_{6\ i}^{гр} e_{6\ ji}^{рем} - \sum_{j=1}^k n_{оц\ ji}^{секц} N_{оц\ i}^{гр} e_{оц\ ji}^{рем} \right) \times l_{уч} 10^{-6}, \text{ млн руб.}, \quad (6)$$

где $n_{6\ ji}^{секц}$, $n_{оц\ ji}^{секц}$ — количество секций локомотива j -й серии, приходящихся на один поезд, соответственно в базовом и оцениваемом вариантах (серия локомотива на участке определяется по данным владельца инфраструктуры согласно приказам Дирекции тяги, содержащим нормы массы и длины грузовых поездов по сериям локомотивов для участка; количество секций соответствующей серии определяется согласно техническим условиям (техническому заданию) на локомотив); $e_{6\ ji}^{рем}$, $e_{оц\ ji}^{рем}$ — стоимость ремонта 1 секц.-км j -й серии локомотива, руб./секц.-км (определяется аналогично п. 2.2. [16] с учетом сервисного обслуживания и всех видов ремонта, соответственно в базовом и оцениваемом вариантах); k — количество серий локомотивов.

Изменение затрат на амортизационные отчисления при изменении пробега (секц.-км) и используемых серий локомотивов по вариантам в i -ом году определяется по формуле

$$\Delta E_{AOi} = \sum_{j=1}^k M_{6\ ji}^{инв} e_{6\ ji}^{АО} - \sum_{j=1}^k M_{оц\ ji}^{инв} e_{оц\ ji}^{АО}, \text{ млн руб.}, \quad (7)$$

где $e_{6\ ji}^{АО}$, $e_{оц\ ji}^{АО}$ — среднее значение годовых амортизационных отчислений в расчете на 1 секцию локомотива j -й серии соответственно в базовом и оцениваемом вариантах, млн руб. (определяется аналогично формуле 2.6 [16] по восстановительной стоимости одной секции, соответственно в базовом и оцениваемом вариантах); $M_{6\ ji}^{инв}$, $M_{оц\ ji}^{инв}$ — инвентарный парк (секции) локомотивов j -й серии соответственно в базовом и оцениваемом вариантах на участке, рассчитывается по формулам

$$M_{6\ ji}^{инв} = N_{6\ i}^{гр} n_{6\ ji}^{секц} l_{уч} k_j^{инв} / (S^{сут} d), \text{ секций}, \quad (8)$$

$$M_{оц\ ji}^{инв} = N_{оц\ i}^{гр} n_{оц\ ji}^{секц} l_{уч} k_j^{инв} / (S^{сут} d), \text{ секций}, \quad (9)$$

где $k_j^{инв}$ — коэффициент, характеризующий соотношение инвентарного и рабочего парка локомотивов в грузовом движении в соответствующем виде тяги;

$S^{\text{сут}}$ — среднесуточный пробег локомотива в грузовом движении соответствующего вида тяги, км/сут; d — количество календарных дней в i -ом году.

Оценка единовременных затрат на приобретение (при необходимости) дополнительного парка поездных локомотивов новых серий, требуемых для организации вождения грузовых поездов, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т [14] (ΔI_{Ti}), выполняется по формуле

$$\Delta I_{Ti} = \sum_{j=1}^k (\Delta M_{л\,ji}^{\text{оц}} \Pi_{\text{НЛ}ji}), \text{ млн руб.}, \quad (10)$$

где $\Pi_{\text{НЛ}ji}$ — цена приобретения поездного локомотива j -й серии, млн руб.; $\Delta M_{л\,ji}^{\text{оц}}$ — дополнительный парк локомотивов j -й серии, округляется до целого числа в большую сторону и определяется по формуле

$$\Delta M_{л\,ji}^{\text{оц}} = \frac{\Delta M_{\text{НЛ}ji}^{\text{оц}}}{n_{л\,ji}^{\text{секц}}}, \text{ локомотивов}, \quad (11)$$

где $n_{л\,ji}^{\text{секц}}$ — количество секций локомотива j -й серии; $\Delta M_{\text{НЛ}ji}^{\text{оц}}$ — дополнительный парк локомотивов (секций) j -й серии для ведения поездов по новой технологии, рассчитывается по формуле

$$\Delta M_{\text{НЛ}ji}^{\text{оц}} = M_{\text{оц}\,ji}^{\text{инв}} - M_{\text{б}\,ji}^{\text{инв}}, \text{ секций}. \quad (12)$$

Изменение затрат, связанное с проведением маневровой работы по изменению массы транзитного состава на станциях перелома массы на участке, определяется по формуле

$$\Delta E_{\text{ман}\,i}^{\text{пм}} = e_{\text{Мт}\,i} (T_{\text{тр}\,б} N_{\text{б}\,i}^{\text{гр}} - T_{\text{тр}\,оц} N_{\text{оц}\,i}^{\text{гр}}) 10^{-6}, \text{ млн руб.}, \quad (13)$$

где $e_{\text{Мт}\,i}$ — единичная расходная ставка на 1 ч работы локомотива в маневровом движении (определяется на основе зависящих затрат по дороге, на которой находится станция перелома массы), руб./ман. лок.ч; $T_{\text{тр}\,б}$, $T_{\text{тр}\,оц}$ — технологическое время на выполнение маневровой работы по изменению массы транзитного состава на станции перелома массы соответственно по базовому и оцениваемому вариантам, ч.

Примеры расчетов. Рассмотрим примеры расчетов экономического эффекта от повышения провозной способности, иллюстрирующие предложенную методологию на направлениях Чегдомын — Новый Ургал — порт Ванино (965 км) и Челутай — порт Находка (3713 км). Участки выбраны в соответствии с распорядительными документами правительственных органов (протоколы Минтранс России от 12.04.2015 г. № АЛ-44 и от 24.08.2017 г. № АЛ-58).

Расчеты проводились в условиях 2017 г. по базовому и оцениваемому вариантам. Базовым принимается вариант, по которому перевозки осуществляются в

грузовых поездах, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 23,5 т, оцениваемый вариант — в грузовых вагонах с нагрузкой на ось 27 т модели 12-9548-01.

1. Для участка Чегдомын — Новый Ургал — порт Ванино объем перевозок, принятый к расчету, равен объему перевозки угля со станции погрузки Чегдомын (Ургальское каменноугольное месторождение) до станции выгрузки порт Ванино, который согласно Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 г. (ДПР) в 2019 г. составит 4,6 млн т, в 2025 г. — 17,2 млн т.

При действующей на данном участке технологии обслуживания тяговых плеч обращения локомотивов норма массы поезда составляет 5600 т, используются тепловозы серии 3ТЭ10МК.

По оценке специалистов локомотивного комплекса, повысить норму массы поезда на рассматриваемом участке при данной серии тепловоза не представляется возможным. В этих условиях, несмотря на планируемый значительный рост объемов перевозок и потребность в увеличении провозной способности на данном участке, говорить об экономическом эффекте от повышения провозной способности при применении большегрузных вагонов не приходится.

Однако если в перспективе рассмотреть возможность тягового обеспечения перевозок Ургальского угля тепловозами 3ТЭ25КМ с массой поездов 7100 т без увеличения унифицированной длины состава, то увеличение массы поезда с 5600 до 7100 т на участке Чегдомын — Новый Ургал — порт Ванино высвободит в 2020–2025 гг. соответственно 1–2 нитки графика, что позволит увеличить провозную способность данного участка, получить дополнительную прибыль в размере 250 млн руб./год в период 2020–2023 гг. и 500 млн руб./год начиная с 2024 г. именно за счет эксплуатации на этом участке вагонов с повышенной до 27 т нагрузкой на ось. Дополнительно появится годовая экономия затрат на обеспечение локомотивной тягой при эксплуатации поездов, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т. В условиях 2019 г. она составит 341,1 млн руб./год, а к 2025 г. с учетом указанного в ДПР роста объемов перевозок угля она возрастет до 1297,9 млн руб./год. На единицу перевозочной работы экономия составит 78,2 руб./1000 т·км нетто.

Эта экономия затрат складывается как за счет значительного снижения секций-километров пробега в оцениваемом варианте при перевозке одного и того же объема груза, так и в результате того, что рассматриваемая для оцениваемого варианта серия тепловоза менее затратна для ОАО «РЖД» в эксплуатации. Так, по данным договорной документации сервисных и ремонтных организаций, общая годовая стоимость сервисного обслуживания и ремонтов 1 секц.-км 3ТЭ25КМ в 2,25 раза ниже, чем 3ТЭ10МК.

2. Во втором примере рассмотрим изменение затрат и финансовых результатов по грузовым перевозкам, осуществляемым в поездах, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 27 т, на электрифицированном участке Транссиба Челутай — порт Находка. В 2017 г. из угольного разреза в долине Тугнуя (станция погрузки Челутай) перевезено в порт Находка более 3,5 млн т угля. На основном протяжении данного участка при действующей технологии обслуживания тяговых плеч поезда массой 6300 т обслуживаются электровозами серии 3ЭС5К. Применение вагонов с нагрузкой на ось 27 т позволяет увеличивать массу поезда до 7500 т (без превышения унифицированной длины поезда и критической нормы массы на участке Челутай — Смоляниново протяженностью 3588 км). В этом случае действующая технология предусматривает использование электровоза серии 2×2ЭС5К.

Необходимо подчеркнуть, что изменение затрат на обеспечение тягой поездов значительно отличается по вариантам в зависимости от принятой технологии обслуживания тяговых плеч на данном участке. При условии, что в базовом и оцениваемом вариантах масса поезда одинакова, расходы на обеспечение тягой отличаются несущественно, и при этом нет увеличения провозной способности. В случае если в базовом варианте масса поезда принята равной 6300 т, а в оцениваемом варианте — 7500 т (на участках, где это возможно без превышения действующих критических норм массы), расходы по обеспечению тягой существенно увеличиваются.

Расчеты показали, что на участке Челутай — порт Находка при массе поезда 7500 т для оцениваемого варианта, в соответствии с утвержденной технологией обслуживания тяговых плеч обращения локомотивов и нормами масс грузовых поездов, суммарное количество секций-километров, приходящихся на одинаковый объем перевезенного груза, существенно больше, чем в базовом варианте (вагон с нагрузкой на ось 23,5 т, масса поезда 6300 т), что ведет к дополнительным затратам в оцениваемом варианте (см. формулы 5–7, 13).

При годовом объеме перевозок, принятом к расчету, равном объему перевезенного угля со станции погрузки Челутай до станции выгрузки порт Находка (3,5 млн т), в оцениваемом варианте дополнительные затраты составили 152,6 млн руб. в год, или 12,1 руб. на 1000 т·км нетто, по сравнению с вариантом перевозки того же объема груза в поездах массой 6300 т, сформированных из вагонов с нагрузкой на ось 23,5 т. В расчете на перспективный объем 2025 г. в соответствии с проектом ДПР (более 10 млн т угля) дополнительные затраты инфраструктуры, связанные с тяговым обеспечением этих перевозок на данном направлении с

использованием электровоза 2×2ЭС5К по сравнению с 3ЭС5К, составят 467 млн руб. ежегодно. При этом положительный эффект от увеличения провозной способности направления с 2025 г. почти на 2,3 млн т в год составит 391 млн руб.

Результаты по рассмотренным примерам сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что эксплуатация вагонов повышенной грузоподъемности, позволяющая увеличить провозную способность направления, в зависимости от его эксплуатационных и экономических характеристик может привести к совершенно разному эффекту в стоимостном выражении для компании — владельца инфраструктуры. Если для направления Чегдомын — порт Ванино эффект положительный и значительный (1,86 млн руб./км в год), то для направления Челутай — порт Находка эффект отрицательный и составляет 0,02 млн руб./км в год.

В данной статье рассмотрены только два взаимосвязанных фактора, которые следует учитывать при определении экономической эффективности грузовых вагонов повышенной грузоподъемности, в частности 4-осных вагонов с нагрузкой на ось 27 т: увеличение провозной способности от повышения массы при сохранении унифицированной длины поезда; соответствующее изменение технологии обслуживания тяговых плеч на направлении в связи с внедрением поездов повышенной массы.

Для комплексной оценки экономического эффекта от эксплуатации инновационных вагонов повышенной грузоподъемности для ОАО «РЖД» как для компании-перевозчика и владельца инфраструктуры необходимо учитывать более широкий перечень как финансово-экономических, так и технико-технологических факторов. При оценке влияния на финансовые результаты компании-перевозчика нельзя не учитывать действующую систему тарифов на грузовые перевозки, в которой уже предусмотрены различные преференции, стимулирующие грузоотправителя к повышению загрузки вагона, дальности перевозки и других параметров, направленных на интенсификацию перевозочного процесса.

Очевидно, следует учесть влияние технических характеристик инновационного вагона на изменение затрат инфраструктуры в части:

- топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов;
- содержания железнодорожного пути, включая верхнее и нижнее строение, искусственные сооружения и единовременные затраты на его подготовку к эксплуатации с учетом новых технических требований;
- технического обслуживания вагонов в пути следования и затраты, методики оценки которых приведены в [11, 17].

Сравнение расчетного эффекта от повышения провозной способности инфраструктуры в результате формирования поездов повышенной массы из вагонов с нагрузкой на ось 27 т на конкретных направлениях в условиях 2025 г.

Comparison of the calculated effect of the increase in the carrying capacity of the infrastructure as a result of the formation of increased mass of trains composed from cars with an axle load of 27 tons in specific directions of 2025

Наименование участка (направления) (протяженность, км)	Технические характеристики обслуживания тяговых плеч: расчетный объем перевозимого груза в 2025 г.; нагрузка вагона на ось, серия локомотива, масса поезда		Результаты применения оцениваемой технологии					
			Изменение затрат по обслуживанию тяговых плеч («+» — экономия, «-» — дополнительные затраты)		Увеличение провозной способности за счет вагонов с нагрузкой на ось 27 т, млн т/год	Увеличение прибыли за счет перевозки дополнительного груза при увеличении провозной способности, млн руб./год	Итого эффект («+» — положительный эффект, «-» — отрицательный) гр. 3 + гр. 6	
	Базовый вариант	Оцениваемый вариант	На расчетный объем, млн руб./год	На единицу перевозочной работы, руб./1000 т·км нетто				
А	1	2	3	4	5	6	7	8
Чегдомын — Новый Ургал — порт Ванино (965 км)	17,2 млн т 23,5 т 3ТЭ10МК 5600 т	17,2 млн т 27 т 3ТЭ25КМ 7100 т	+1297,9	+78,2	+4,09	+500	+1797,9	+1,86
Челутай — порт Находка (3713 км)	10,4 млн т 23,5 т 3ЭС5К 6300 т	10,4 млн т 27 т 2×2ЭС5К 7500 т	-467,0	-12,1	+2,3	+391	-76,0	-0,02

Заключение. В статье представлена методология расчета экономического эффекта от повышения провозной способности участка при перевозках в вагонах с повышенной нагрузкой на ось. Областью применения данной методологии являются конкретные участки (направления) с учетом их технико-эксплуатационных и экономических параметров.

Выполнены вариантные расчеты, результаты которых показали, что увеличение провозной способности участка при повышении массы поезда, сформированного из вагонов с повышенной нагрузкой на ось, не всегда дает значимый положительный эффект в стоимостном выражении для владельца инфраструктуры.

Положительный эффект от увеличения провозной способности в виде получения дополнительной прибыли от дополнительно освоенного объема перевозок в оцениваемом варианте может быть получен в случаях:

- эксплуатации большегрузных вагонов на грузонапряженных участках, где имеется недостаток провозной способности в расчетном периоде, т. е. провозная способность участка меньше ее потребной величины;
- превышения провозной платы за дополнительно освоенный объем перевозок груза возникающих перевозочных издержек, т. е. если тарифом компенсируется как минимум зависящая часть расходов по перевозкам дополнительного объема.

Положительный денежный поток от повышения провозной способности достигается, если прибыль от дополнительного объема перевозок на направлении превысит затраты, связанные с изменением тех-

нологии обслуживания тяговых плеч при продвижении поездов повышенной массы, сформированных из вагонов с повышенной нагрузкой на ось. Другими словами, если не произойдет увеличения значения показателя пробега (в секц.-км.), приходящегося на единицу транспортной работы, и удельных затрат на содержание одной секции при новой технологии обслуживания тяговых плеч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении программы долгосрочного развития ОАО «РЖД» до 2025 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р. URL: <https://www.zakonrf.info/gasporiazhenie-pravitelstvo-rf-466-r-19032019/> (дата обращения: 27.03.2019 г.).
2. Баранов А. М., Козлов В. Е., Фельдман Э. Д. Развитие пропускной и провозной способностей однопутных линий. М.: Транспорт, 1964. 196 с. (Труды ВНИИЖТ; вып. 280).
3. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования [Электронный ресурс]: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 18 июля 2018 г. № 266. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (дата обращения: 19.09.2018 г.).
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Электронный ресурс]: утв. Минэкономики России, Минфином России и Госстроем России от 21 июня 1999 г. № ВК477. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005634> (дата обращения: 19.09.2018 г.).
5. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте: утв. указанием МПС России от 31 авг. 1998 г. № В-1024у.
6. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон от 10 янв. 2003 г. № 18-ФЗ.

URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ (дата обращения: 19.09.2018 г.).

7. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон от 10 янв. 2003 г. № 17-ФЗ (в редакции от 3 авг. 2018 г.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/ (дата обращения: 19.09.2018 г.).

8. Об утверждении методических рекомендаций по составу и содержанию обосновывающих материалов по инвестиционным проектам: распоряжение ОАО «РЖД» от 28 нояб. 2016 г. № 2396р.

9. Налоговый кодекс Российской Федерации (вторая часть) [Электронный ресурс]: федер. закон от 5 авг. 2000 г. № 117-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28165/ (дата обращения: 19.09.2018 г.).

10. О методических рекомендациях по расчету экономической эффективности новой техники, технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 28 нояб. 2008 г. № 2538р. URL: <http://scbist.com/2005-2008-gody/25274-2538r-ot-28-noyabrya-2008-g-o-metodicheskikh-rekomendaciyah-po-raschetu-ekonomicheskoi-effektivnosti-novoi-tehniki-tehnologii-obektov-intellektualnoi-sobstvennosti-i-racionalizatorskikh-predlozhenii.html> (дата обращения: 19.09.2018 г.).

11. Комплексная методика оценки технологической и экономической эффективности тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов на железнодорожных линиях, учитывающая их влияние на стоимость жизненного цикла объектов инфраструктуры и тягового подвижного состава: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22 дек. 2016 г. № 2628р.

12. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог [Электронный ресурс]: утв. приказом ОАО «РЖД» от 10 нояб. 2010 г. № 128. URL: <https://jd-doc.ru/2010/10/2010/5908-polozhenie-oao-rzhd-ot-16-11-2010-n-86> (дата обращения: 19.09.2018 г.).

13. Методика расчета экономической эффективности тяжеловесного движения в структуре локомотивного комплекса: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 1 апр. 2016 г. № 292.

14. Мирошниченко О. Ф., Огинская А. Е. Методология определения экономического эффекта от эксплуатации грузовых поездов, сформированных из вагонов с нагрузкой до 27 т на ось на конкретном железнодорожном направлении // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Ч. 1 / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричани. М.: РАС, 2019. С. 7–15.

15. Методика расчета численности работников локомотивных бригад ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 1 окт. 2013 г. № 2105р. URL: <https://jd-doc.ru/2013/oktyabr-2013/4807-rasporozhazhenie-oao-rzhd-ot-01-10-2013-n-2105r> (дата обращения: 19.09.2018 г.).

16. Методика расчета ставок платы при предоставлении услуг локомотивного комплекса ОАО «РЖД» сторонним организациям [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23 нояб. 2018 г. № 2474р. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314457/ (дата обращения: 20.09.2018 г.).

17. Методика оценки экономической эффективности эксплуатации грузовых инновационных вагонов на железнодорожной инфраструктуре российских железных дорог [Электронный ресурс]: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 23 окт. 2017 г. № 457. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542610437> (дата обращения: 19.09.2018 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МИРОШНИЧЕНКО Ольга Федоровна,

д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

ОГИНСКАЯ Анна Евгеньевна,

канд. экон. наук, заведующий лабораторией «Эффективность бизнес-процессов пассажирского комплекса», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 22.09.2018 г., принята к публикации 30.12.2018 г.

Methodology for calculating financial result for the owner of the infrastructure from increasing carrying capacity of the direction during operation in cars with increased capacity

O. F. MIROSHNICHENKO, A. E. OGINSKAYA

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. In accordance with the draft Long-Term Development Program of the JSC "Russian Railways" until 2025, the main driver of growth in freight turnover in this perspective will be a further increase in the transportation of hard coal. It will occur both due to the growth of coal production in Kuzbass and due to the development of new coal deposits. For the period up to 2025, the increase in coal loading by 4–5 % per year is predicted on rail transport. Under these conditions, it becomes necessary to increase the capacity of the transport complex, especially the carrying and transport capacities of the Eastern Operation Area.

The article presents the methodology for calculating economic effect of increasing the carrying capacity of the site during operation in cars with increased axle load. The scope of this methodology is specific areas (sections), taking into account their technical, operational and economic parameters.

Variant calculations were made, the results of which showed that an increase in the carrying capacity of a section with an increase in the mass of a train formed from cars with increased axle loads does not always give a significant positive effect in terms of value for the infrastructure owner.

Positive effect of the increase in carrying capacity in the form of additional profits from the additionally used traffic volume in the evaluated variant can be taken into account in the following cases:

- operation of large-capacity cars on freight-intensive sections where there is a lack of carrying capacity in the billing period, i. e. the carrying capacity of the section is less than its required value;
- exceeding the freight charge for the additional volume of freight carriage incurred transportation costs, i. e. if the tariff compensates for at least the dependent part of the cost of additional volume transportation.

Positive economic effect of the increase in carrying capacity in the form of increased money flow is achieved if the profit from the additional traffic volume in the direction exceeds the additional costs associated with changing the technology for servicing the traction arms while promoting high-weight trains formed from cars with increased axle loads. In other words, if there is no increase in the value of the indicator of mileage (in section-km) per unit of transport work, and the unit cost of maintaining one section with a new technology for servicing traction arms.

Keywords: financial results; carrying capacity; train weight; freight cars with axle load 27 t; cost of locomotive complex

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-33-40>

REFERENCES

1. *On approval of the long-term development program of Russian Railways until 2025*. Order of the Government of the Russian Federation no. 466-p on March 19, 2019. URL: <https://www.zakonrf.info/rasporiazhenie-pravitelstvo-rf-466-r-19032019/> (retrieved on 27.03.2019) (in Russ.).
2. Baranov A. M., Kozlov V. E., Fel'dman E. D. *Razvitie propusknoy i provoznoy sposobnostey odnopusnykh liniy*. Trudy VNIIZhT [Development of the throughput and carrying capacity of single-track lines. Proc. of the JSC "VNIIZhT"]. Moscow. Transport Publ., 1964, no. 280, 196 p.
3. *Methods of determining the throughput and carrying capacity of the public railway transport infrastructure*. Approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. 266 on July 18, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542629643> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).
4. *Guidelines for evaluating the effectiveness of investment projects*. Approved by the Ministry of Economics of Russia, the Ministry of Finance of Russia and the State Construction Committee of Russia no. VK477 on June 21, 1999. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005634> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).
5. *Guidelines for the evaluation of investment projects in railway transport*. Approved by the Directorate of the Ministry of Railways of Russia no. B-1024y on August 31, 1998 (in Russ.).
6. *Charter of railway transport of the Russian Federation*. Federal law of January 10, 2003 no. 18-FZ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/ (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).
7. *On railway transport in the Russian Federation*. Federal law of January 10, 2003 no. 17-FZ (as amended on August 3, 2018). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/ (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).
8. *On approval of methodological recommendations on the composition and content of substantiating materials on investment projects*. Order of the JSC "RZD" no. 2396r on November 28, 2016 (in Russ.).
9. *Tax Code of the Russian Federation (second part)*. Federal Law of August 5, 2000 no. 117-FZ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28165/ (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).
10. *On the methodological recommendations for calculating the economic efficiency of new equipment, technology, intellectual property and rationalization proposals*. Order of the JSC "RZD" no. 2538r on November 28, 2008. URL: <http://scbist.com/2005-2008-gody/25274-2538r-ot-28-noyabrya-2008-g-o-metodicheskikh-rekomendatsiyah-po-raschetu-ekonomicheskoi-effektivnosti-novoi-tehniki-tehnologii-obektov-intellektualnoisobstvennosti-i-racionalizatsionnykh-predlozhenii.html> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).

■ E-mail: Oginskaya.Ann@vniizht.ru (A. E. Oginskaya)

11. *Comprehensive methods of assessing technological and economic efficiency of heavy haul traffic and driving connected trains on railway lines, taking into account their impact on the life cycle cost of infrastructure facilities and traction rolling stock*. Approved by order of the JSC "RZD" no. 2628r on December 22, 2016. (in Russ.).

12. *Instructions for calculating the money capacity of railways*. Approved by order of the JSC "RZD" no. 128 on November 10, 2010. URL: <https://jd-doc.ru/2010/noyabr-2010/5908-polozhenie-oao-rzhd-ot-16-11-2010-n-86> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).

13. *Methods of calculating economic efficiency of heavy haul traffic in the structure of the locomotive complex*. Approved by order of the JSC "RZD" no. 292 on April 1, 2016 (in Russ.).

14. Miroshnichenko O. F., Oginskaya A. E., Kosarev A. B., Gogrichiani G. V. *Metodologiya opredeleniya ekonomicheskogo effekta ot ekspluatatsii gruzovykh poezdov, sformirovannykh iz vagonov s nagruzkoj do 27 t na os' na konkretnom zhelezнодорожном направлении* [Methodology of determining economic effect of the operation of freight trains formed from cars with a load of up to 27 tons per axle on a particular railway direction]. Aktual'nye voprosy razvitiya zhelezнодорожного transporta. Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezнодорожного transporta. Ch. 1 [Actual issues of railway transport development. Materials of Russian scientific-practical conference to the 75th anniversary of the post-graduate school of the Railway Research Institute. Part 1]. Moscow, RAS Publ., 2019, pp. 7–15.

15. *Methods of calculating the number of employees of locomotive brigades of the JSC "RZD"*. Approved by the order of the JSC "RZD" no. 2105r on October 1, 2013. URL: <https://jd-doc.ru/2013/oktyabr-2013/4807-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-01-10-2013-n-2105r> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).

16. *Methods of calculating the rates of payment in the provision of services of the locomotive complex of the JSC "RZD" to third parties*. Approved by the order of the JSC "RZD" no. 2474r on November 23, 2018. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314457/ (retrieved on 20.09.2018) (in Russ.).

17. *Methods of assessing economic efficiency of operating innovative freight cars on the railway infrastructure of the Russian Railways*. Approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation no. 457 on October 23, 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/542610437> (retrieved on 19.09.2018) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Ol'ga F. MIROSHNICHENKO,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chief Researcher, JSC "VNIIZhT"

Anna E. OGINSKAYA,
Cand. Sci. (Econ.), Head of the Laboratory "Efficiency of business processes for passenger complex", JSC "VNIIZhT"

Received 22.09.2018

Accepted 30.12.2018

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Вопросы развития железнодорожного транспорта: сб. тр. ученых АО «ВНИИЖТ» / под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричани. М.: РАС, 2017. 272 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы, связанные с подвижным составом, тягой поездов, а также вопросы пути, путевого хозяйства и металловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

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

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Моделирование движения вагона и расчет износа колес с профилем поверхности катания ВНИЦТТ

А. М. ОРЛОВА¹, Ю. В. САВУШКИНА², В. И. ФЕДОРОВА²

¹ Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Объединенная Вагонная Компания» (ПАО «НПК ОВК»), Москва, 115184, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий» (ООО «ВНИЦТТ»), Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты математического моделирования движения грузового вагона и прогнозирования износов гребня и поверхности катания колес с новым профилем поверхности катания ВНИЦТТ и на профиле по ГОСТ 10791–2011 (рис. Б.1). Проведено сравнение показателей динамических качеств вагона и темпов износа колес на участке пути, близком к среднесетевым условиям эксплуатации.

Ключевые слова: профиль поверхности катания; железнодорожное колесо; грузовой вагон; моделирование движения; моделирование износа

Введение. Проблемой износа колес по прокату или тонкому гребню (наиболее часто встречающиеся в эксплуатации виды естественного износа) в настоящее время занимается большой круг специалистов, начиная от операторов (собственников) подвижного состава до специализированных научных организаций. В работе [1] отмечено, что одним из решений проблемы износа колес и увеличения межремонтного пробега между обточками является разработка нового профиля поверхности катания колеса, разработана методика проектирования и получена новая геометрия профиля. В методике учтены следующие данные: среднеизношенная геометрия профиля головки рельса на сети железных дорог России, периоды приработки колес (отдельно поверхности катания и гребня колеса), основные виды неисправностей колес в эксплуатации, опыт стран, которые давно перешагнули рубеж нагрузки на ось 25–36 т. Проанализирована кинематика движения колесной пары и факторы, которые на нее влияют. Результирующая форма профиля поверхности катания колеса получила название профиль ВНИЦТТ.

Профиль ВНИЦТТ имеет криволинейную поверхность с тремя радиусами кривизны на поверхности катания, соответственно от круга катания к гребню: 500, 325 и 87,5 мм. Радиус выкружки гребня в сравнении с профилем по ГОСТ 10791–2011 «Колеса цельнокатанные. Технические условия» (рис. Б.1) увеличился на 2 мм и составил 17 мм. Угол наклона гребня составил 68°, а толщина гребня — 32,5 мм. Часть поверхности катания колеса от круга катания до наружной части

обода полностью соответствует ГОСТ 10791–2011 (рис. Б.1) (Профиль поверхности обода железнодорожного колеса: пат. № 2018123345 ФИПС (Роспатент): МПК В60В 17/00 (2006.01) / В.И. Федорова [и др.]. Заявл. 27.06.2018). Каждый выбранный радиус на профиле обоснован и отвечает за работу колеса на определенном участке пути — прямом или кривых [1], что подтверждается конструкцией профиля поверхности катания колеса при помощи метода математического моделирования движения вагона.

Результаты моделирования ходовых качеств вагона и износа колес с профилем ВНИЦТТ в сравнении с профилем по ГОСТ 10791–2011. Целью расчета являлось сравнение показателей динамических качеств (ПДК) и износа колес универсального полувагона, установленного на тележки 18-9855 с разными профилями колес: профилем по ГОСТ 10791–2011 (рис. Б.1) и профилем ВНИЦТТ. Моделирование движения вагона производилось с использованием ЭВМ в рамках подхода, реализованного в программном комплексе MEDYNA. Подробно модель описана в работах [2, 3].

В исследовании рассматривался универсальный полувагон в порожнем и груженом состоянии со статическими нагрузками на ось 6,24 т (61,21 кН) и 25 т (245,25 кН) соответственно. Моделирование производилось на рельсах Р65 в новом состоянии и в изношенном [4] для различных участков пути, комбинации взаимодействия колеса с рельсом представлены в табл. 1, где:

- новый рельс, без износов (R_0);
- рельс с вертикальным износом головки 2 мм (R_1);
- рельс с вертикальным износом 2,5 мм и боковым 6 мм (R_2);
- рельс с вертикальным износом 2,5 мм и боковым износом 10 мм (R_3);
- рельс с вертикальным износом головки 4 мм (R_4).

Расчет производился в соответствии с ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [5]. Скорость движения на прямолинейном участке пути и в кривой

■ E-mail: vfedorova@tt-center.ru (В. И. Федорова)

Таблица 1

Комбинации взаимодействия колеса с рельсом при моделировании вагона для определения ходовых качеств

Table 1

Combinations of wheel – rail interaction when modeling a car to determine road performance

Участок пути	Комбинации взаимодействия колеса с рельсом			
	Новый рельс — профиль ГОСТ 10791–2011	Новый рельс — профиль ВНИЦТТ	Износенный рельс — профиль ГОСТ 10791–2011	Износенный рельс — профиль ВНИЦТТ
Прямая	Левая нить R0 Правая нить R0		Левая нить R4 Правая нить R4	
Кривая R=650 м	Левая нить R0 Правая нить R0		Левая нить R1 Правая нить R2	
Кривая R=350 м	Левая нить R0 Правая нить R0		Левая нить R1 Правая нить R3	

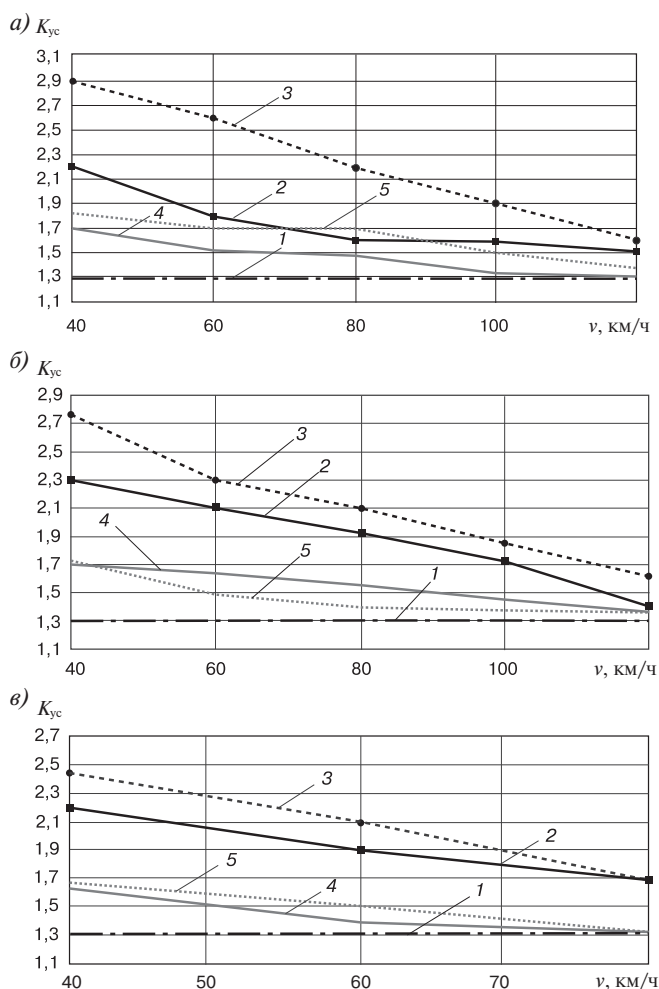


Рис. 1. Коэффициент запаса устойчивости K_{yc} от схода колеса с рельса на прямом участке пути (а), для кривой $R=650$ м (б), кривой $R=350$ м (в) для порожнего вагона: 1 — допускаемый K_{yc} ; 2 — профиль ВНИЦТТ на новых рельсах; 3 — профиль ВНИЦТТ на изношенных рельсах; 4 — профиль ГОСТ 10791–2011 на новых рельсах; 5 — профиль ГОСТ 10791–2011 на изношенных рельсах

Fig. 1. Coefficient of stability K_{yc} from the wheel derailment of an empty car on the tangent section of the track (a), on the curve $R=650$ m (b), on the curve $R=350$ m (c): 1 — allowed K_{yc} ; 2 — VNITsTT profile on new rails; 3 — VNITsTT profile on worn-out rails; 4 — GOST 10791–2011 profile on new rails; 5 — GOST 10791–2011 profile on worn-out rails

радиусом 650 м составляла 40, 60, 80, 100 и 120 км/ч. Движение в кривой радиусом 350 м моделировалось со скоростями 40, 60 и 80 км/ч. Длина прямого участка составляла 20 м, переходной кривой — 180 м для круговой кривой радиусом 650 м и 160 м для круговой кривой радиусом 350 м; возвышение наружного рельса — 0,15 м, ширина колеи — 1520 мм.

Для оценки безопасности движения вагона на колесах с профилем ВНИЦТТ в сравнении с профилем по ГОСТ 10791–2011 были определены ПДК: максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке, коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса, критическая скорость. В рамках исследования было установлено, что существенного влияния на коэффициенты динамической добавки изменение формы профиля колеса не оказывает.

Результаты расчета приведены на рис. 1–5, на которых изображены определяемые показатели в зависимости от скорости движения на различных участках пути (допускаемые значения на рисунках изображены штрихпунктирной линией).

Применение нового профиля ВНИЦТТ обеспечивает увеличение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса в среднем на 30 %, снижение рамных сил на 15 %, критическая скорость извилистого движения колесных пар, несмотря на увеличенную эквивалентную конусность [1], практически не изменилась (увеличение на 6 %). Достаточность критической скорости подтвердила правильность сделанного предположения о преобладании псевдопроскальзывания в продольном направлении над поперечным и необходимости реализовывать вытянутую в поперечном направлении форму пятна контакта.

Также в рамках исследования был произведен расчет износа профиля ВНИЦТТ в сравнении с профилем по ГОСТ 10791–2011. Износ поверхности катания измерен по кругу катания, а износ гребня — на расстоянии 18 мм от его вершины.

Для моделирования был выбран S-образный участок, состоящий из прямой, правой кривой радиусом

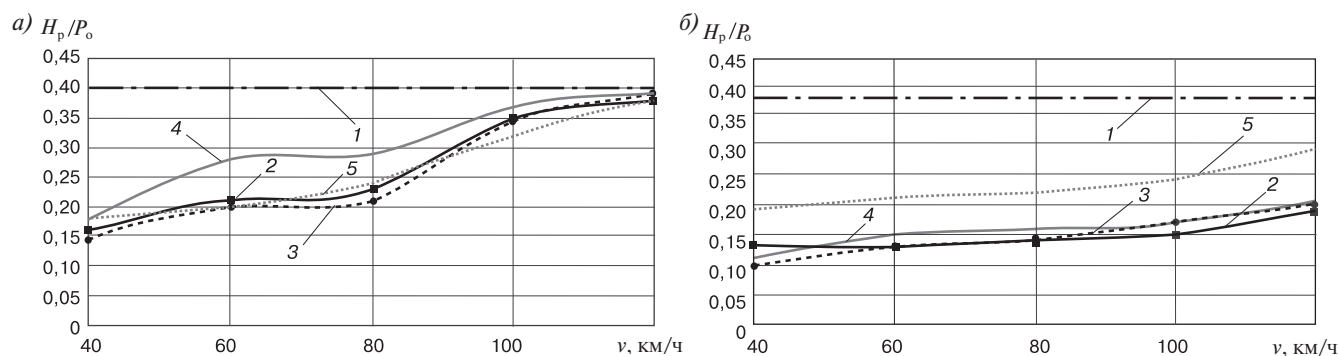


Рис. 2. Максимальное отношение рамной силы H_p к статической осевой нагрузке P_0 на прямом участке пути для порожнего (а) и груженого (б) вагона:

1 — отношение H_p/P_0 ; 2 — профиль ВНИЦТТ на новых рельсах; 3 — профиль ВНИЦТТ на изношенных рельсах; 4 — профиль ГОСТ 10791–2011 на новых рельсах; 5 — профиль ГОСТ 10791–2011 на изношенных рельсах

Fig. 2. Maximum ratio of the frame force H_p to the static axle load P_0 on the tangent section of the track for the empty (a) and loaded (б) car:

1 — H_p/P_0 ratio; 2 — VNITsTT profile on new rails; 3 — VNITsTT profile on worn-out rails; 4 — GOST 10791–2011 profile on new rails; 5 — GOST 10791–2011 profile on worn-out rails

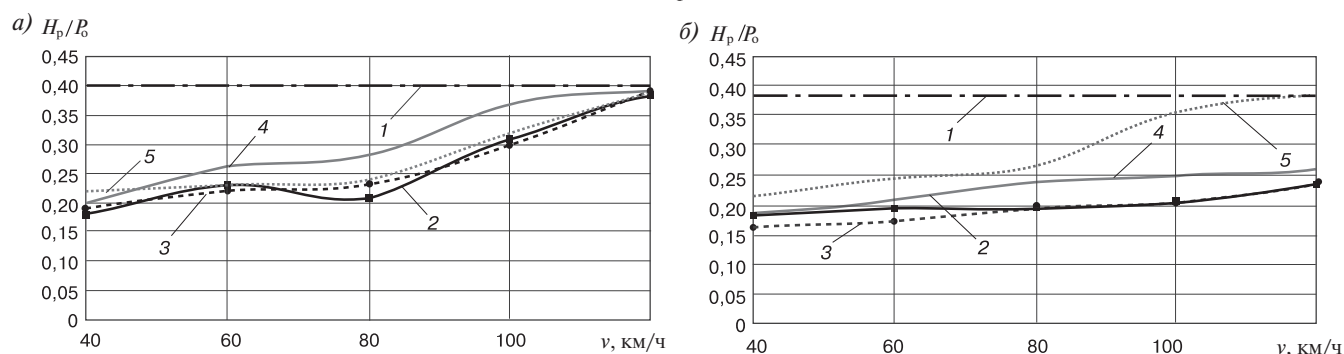


Рис. 3. Максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке для кривой $R=650$ м для порожнего (а) и груженого (б) вагона:

1 — отношение H_p/P_0 ; 2 — профиль ВНИЦТТ на новых рельсах; 3 — профиль ВНИЦТТ на изношенных рельсах; 4 — профиль ГОСТ 10791–2011 на новых рельсах; 5 — профиль ГОСТ 10791–2011 на изношенных рельсах

Fig. 3. Maximum ratio of the frame force to the static axle load on the curve $R=650$ m for an empty (a) and loaded (б) car:

1 — H_p/P_0 ratio; 2 — VNITsTT profile on new rails; 3 — VNITsTT profile on worn-out rails; 4 — GOST 10791–2011 profile on new rails; 5 — GOST 10791–2011 profile on worn-out rails

$R=350$ м и левой кривой — $R=650$ м с переходными кривыми, что близко к среднесетевым условиям, где 65 % составляют прямые, 20 % — кривые средних радиусов, 15 % — кривые малых радиусов. Данные значения рекомендованы ГОСТ 33211–2014 [5] и в полной мере соответствуют усредненным статистическим данным по российским железным дорогам [6]. Для расчета износа использовался рельс Р65 (подуклонка 1:20) без износа.

Расчет износа производился с использованием модели абразивного износа Арчарда [3, 7], согласно которой масса изношенного материала пропорциональна работе сил трения, причем различаются фазы слабого и сильного износа. Коэффициент износа был назначен с учетом результатов, полученных в работе [2].

На рис. 6 представлена средняя форма износа профиля колеса по всем колесам, полученная по результатам расчетов в MEDYNA, а на рис. 7 — зависимость износа колеса от пробега.

Форма износа профиля ВНИЦТТ, как видно из рис. 6, принципиально отличается от формы износа

профиля по ГОСТ 10791–2011. В профиле ВНИЦТТ износ протекает равномерно по всей поверхности катания, как и предполагалось в поставленной задаче исследования, в отличие от профиля по ГОСТ 10791–2011 нет преобладания износа гребня, а темпы износа меньше (рис. 7). При применении профиля ВНИЦТТ износ поверхности катания нарастает ориентировочно до пробега 100 тыс. км, после чего резко снижается, в то время как у профиля по ГОСТ 10791–2011 износ нарастает постоянно во всем исследованном диапазоне пробега до 200 тыс. км. Это качественно совпадает с результатами измерений [8, 9]. При сочетании различных комбинаций в статическом состоянии, как видно из рис. 8, область контакта колеса с рельсом практически неизменна и является конформной или близкой к конформной форме контакта. Профиль колеса ВНИЦТТ в процессе моделирования прирабатывается к форме профиля рельса, и зона выкружки и переходной участок от выкружки к кругу катания перенимают очертания

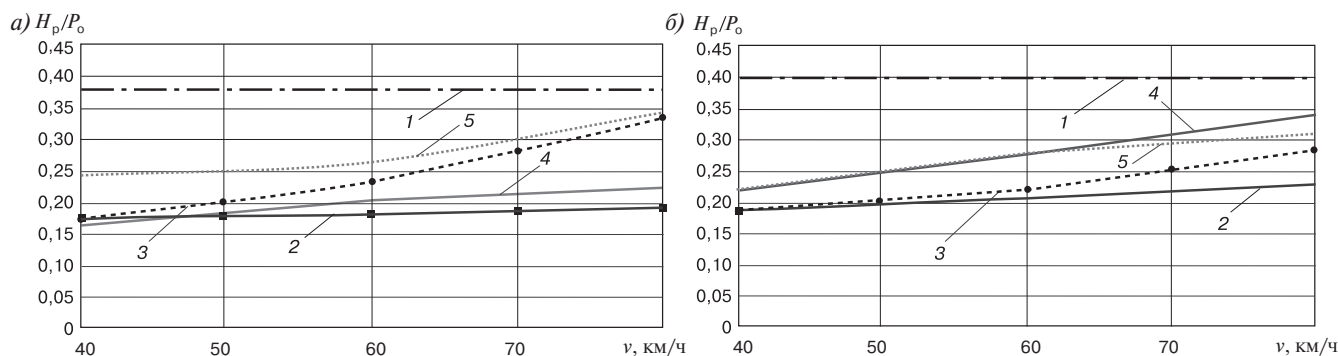


Рис. 4. Максимальное отношение рамной силы к статической осевой нагрузке для кривой $R=350$ м для порожнего (а) и груженого (б) вагона: 1 — отношение H_p/P_0 ; 2 — профиль ВНИЦТТ на новых рельсах; 3 — профиль ВНИЦТТ на изношенных рельсах; 4 — профиль ГОСТ 10791–2011 на новых рельсах; 5 — профиль ГОСТ 10791–2011 на изношенных рельсах
Fig. 4. Maximum ratio of the frame force to the static axle load on the curve $R=350$ m for an empty (a) and loaded (b) car: 1 — H_p/P_0 ratio; 2 — VNITsTT profile on new rails; 3 — VNITsTT profile on worn-out rails; 4 — GOST 10791–2011 profile on new rails; 5 — GOST 10791–2011 profile on worn-out rails

профиля головки рельса, что влечет за собой уменьшение величины поперечных сил и контактных напряжений.

В процессе износа геометрия профиля ВНИЦТТ изменяется несущественно, так, например, на рассматриваемом интервале расчета при пробеге в 60 тыс. км угол наклона гребня сохраняется, как в новом состоянии, на 0,5 мм увеличивается радиус выкружки, износ поверхности катания незначителен.

При пробеге в 200 тыс. км угол наклона гребня составляет 71° , радиус выкружки и переход с радиуса выкружки к центральной части колеса увеличиваются соответственно до 19, 91, 331 мм. В целом по результатам расчетов износ поверхности катания у профиля ВНИЦТТ ниже, чем у профиля по ГОСТ 10791–2011, на 32 %, а износ гребня — ниже на 24 %.

Теоретический расчет ресурса колеса на основе полученных результатов математического моделирования в MEDYNA. На основе приведенных данных в работе [8] выполнен расчет ресурса поверхности катания и

гребня колеса до первой обточкой, по критерию естественного износа.

В табл. 2 представлен средний темп износа для поверхности катания и гребня колеса по результатам математического моделирования. При расчете износа в программном комплексе MEDYNA не предполагается период приработки гребня и поверхности катания колеса, поэтому для расчета было принято решение взять средний темп износа за весь период моделирования.

Для расчета было принято, что запас на износ для гребня $Z_{гр} = 8$ мм для профиля по ГОСТ 10791–2011 и $Z_{гр} = 7,5$ мм для профиля ВНИЦТТ (с учетом, что профиль изначально выбран новый с толщиной гребня 33 и 32,5 мм соответственно) и поверхности катания $Z_{кат} = 9$ мм (предельно допустимый прокат в эксплуатации).

По приведенным формулам (1)–(2) рассчитан предельный ресурс до первой обточкой, отдельно для гребня и поверхности катания колеса:

$$Z_{гр} = \sum_{i=1}^2 \dot{I}_i L_j; \quad (1)$$

$$Z_{кат} = \sum_{i=1}^4 \dot{I}_i L_j, \quad (2)$$

где $\dot{I}_i$ — темп износа, соответствующий каждому шагу расчета; L_j — пробег вагона, отвечающий каждому шагу расчета.

По выполненным расчетам было определено, что ресурс гребня до обточкой для профиля ВНИЦТТ составляет 409,3 тыс. км, а для поверхности катания — 663,3 тыс. км, для профиля по ГОСТ 10791–2011 ресурс для гребня составил 285,6 тыс. км, а для поверхности катания 401,2 тыс. км. Таким образом, применение профиля ВНИЦТТ эффективнее использования профиля по ГОСТ 10791–2011 на 30,2 % для гребня и 39,5 % для поверхности катания.

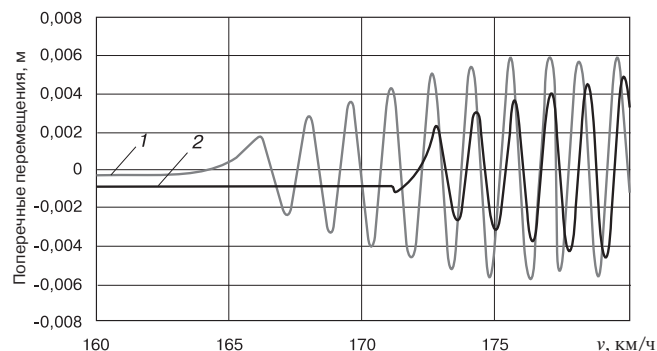


Рис. 5. Зависимость поперечных перемещений колесной пары от скорости движения порожнего вагона на профиле по ГОСТ 10791–2011 (1) и профиле ВНИЦТТ (2)

Fig. 5. Dependence of the transverse displacements of the wheelset on the speed of an empty car on the profile made according to GOST 10791–2011 (1) and the VNITsTT profile (2).

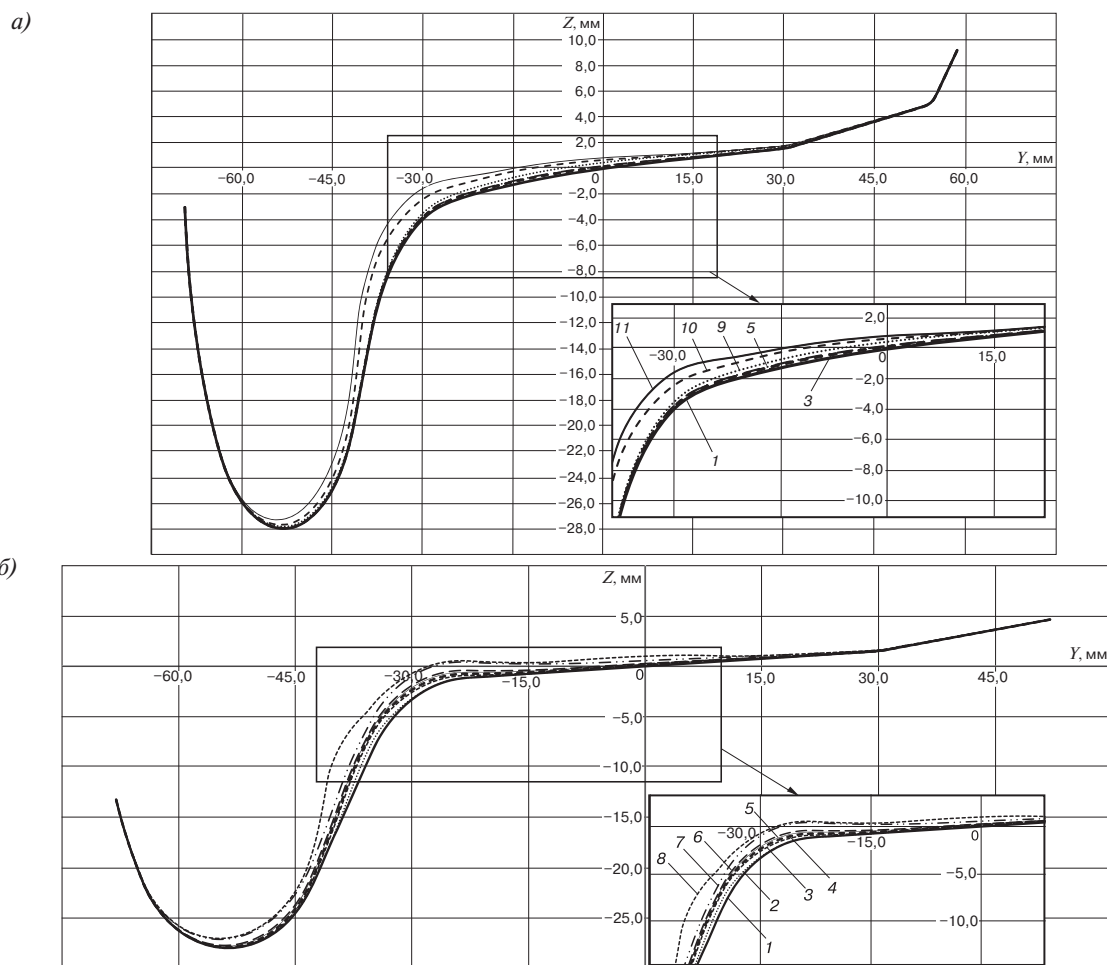


Рис. 6. Форма износа поверхностей катания профиля ВНИЦТТ (а) и профиля по ГОСТ 10791–2011 (б) в паре с новым рельсом Р65: 1 — в новом состоянии; 2 — пробег 20 тыс. км; 3 — пробег 40 тыс. км; 4 — пробег 60 тыс. км; 5 — пробег 80 тыс. км; 6 — пробег 100 тыс. км; 7 — пробег 120 тыс. км; 8 — пробег 140 тыс. км; 9 — пробег 160 тыс. км; 10 — пробег 220 тыс. км; 11 — пробег 250 тыс. км
Fig. 6. Wear form of the rolling surfaces of the VNITsTT profile (a) and the profile according to GOST 10791–2011 (b) together with the new rail R65: 1 — in a new condition; 2 — 20 thousand km mileage; 3 — 40 thousand km mileage; 4 — 60 thousand km mileage; 5 — 80 thousand km mileage; 6 — 100 thousand km mileage; 7 — 120 thousand km mileage; 8 — 140 thousand km mileage; 9 — 160 thousand km mileage; 10 — 220 thousand km mileage; 11 — 250 thousand km mileage

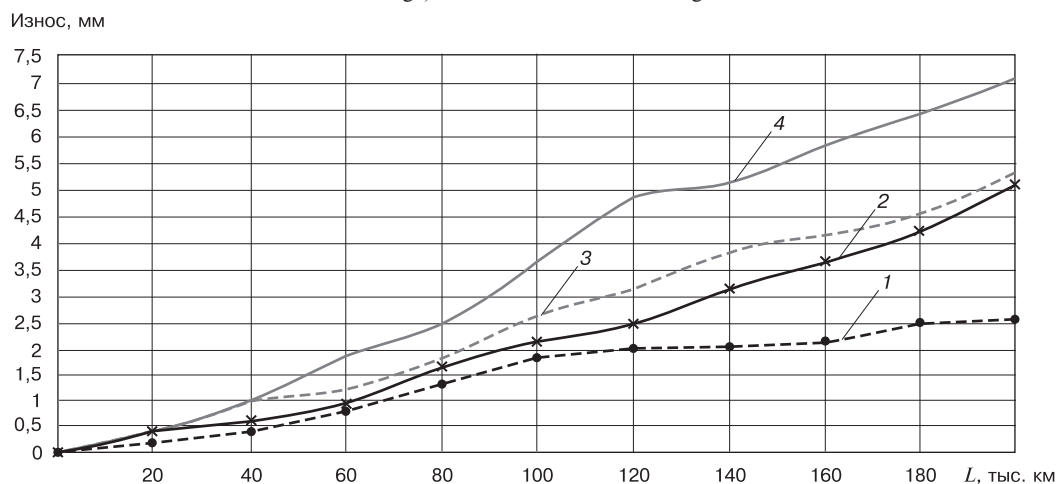


Рис. 7. Зависимость износа профилей колес от пробега:
1 — износ по кругу катания (профиль ВНИЦТТ); 2 — износ по кругу катания (профиль по ГОСТ 10791–2011); 3 — износ гребня (профиль ВНИЦТТ); 4 — износ гребня (профиль по ГОСТ 10791–2011)
Fig. 7. Dependence of the wear profiles of the wheels on track: 1 — wear along tread diameter (VNITsTT profile); 2 — wear along tread diameter (GOST 10791–2011 profile); 3 — flange wear (VNITsTT profile); 4 — flange wear (GOST 10791–2011 profile)

Таблица 2

Показатели темпов износа колес по результатам моделирования и эксплуатации, мм/10 тыс. км

Table 2

Indicators of wheel wear rates according to the results of modeling and operation, mm/10 thousand km

В эксплуатации				Моделирование профиля ВНИЦТТ		Моделирование профиля ГОСТ 10791–2011	
На момент приработки (гребень)	В стационарном режиме (гребень)	На момент приработки (поверхность катания)	В стационарном режиме (поверхность катания)	Гребень	Поверхность катания	Гребень	Поверхность катания
0,381	0,034	0,73	0,71	0,373	0,276	0,576	0,461

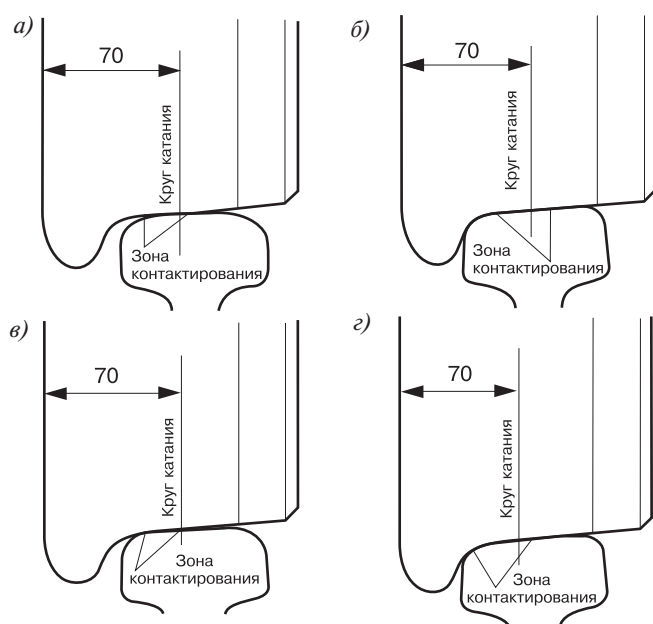


Рис. 8. Комбинации взаимодействия колеса с рельсом:

- а — рельс Р65 (новый), профиль ВНИЦТТ (новый);
 б — рельс Р65 (изношенный), профиль ВНИЦТТ (новый);
 в — рельс Р65 (новый), профиль ВНИЦТТ (изношенный);
 з — рельс Р65 (изношенный), профиль ВНИЦТТ (изношенный)
- Fig. 8. Wheel–rail interaction combinations:
 а — rail R65 (new), VNITsTT profile (new); б — rail R65 (worn-out), VNITsTT profile (new); в — rail R65 (new), VNITsTT profile (worn-out); з — rail R65 (worn-out), VNITsTT profile (worn-out)

Закключение. По результатам выполненных расчетов, используя программный комплекс MEDYNA, были определены ПДК и износ колес, а также рассчитан ресурс до первой обточки колеса для профиля ВНИЦТТ и профиля по ГОСТ 10791–2011 (рис. Б.1).

Разработанный профиль ВНИЦТТ в сравнении с профилем по ГОСТ 10791–2011 по результатам расчетов подтвердил обеспечение нормативных ПДК: коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса в среднем увеличился на 30 %, рамные силы снизились на 15 %, критическая скорость извилистого движения колесных пар, несмотря на увеличенную эквивалентную конусность, практически не изменилась (увеличение на 6 %).

По результатам расчета в программном комплексе MEDYNA износ по кругу катания у профиля ВНИЦТТ

оказался ниже, чем у профиля по ГОСТ 10791–2011 на 32 %, а износ гребня — на 24 %.

Выполненные расчеты ресурса колеса до первой обточки показали, что применение профиля ВНИЦТТ эффективнее использования профиля по ГОСТ 10791–2011 на 30,2 % для гребня и 39,5 % для поверхности катания. Результаты теоретического расчета адекватно отразили данные, полученные в программном комплексе MEDYNA, расхождение не превысило 7,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлова А. М., Савушкин Р. А., Федорова В. И. Разработка улучшенного профиля колеса для грузового вагона. Теоретическое обоснование // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-269-279>.
- Саидова А. В., Орлова А. М. Разработка математических моделей вагонов на тележках 18-9810 и 18-9855 для исследования износов колес // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. № 2 (44). С. 118–123.
- Saidova A., Orlova A. Refining the parameters of Archard's wear model for calculating wear of wheels applied for 25 t per axle freight wagons on Russian railways // Vehicle System Dynamics. 2014. Vol. 52. Issue: sup 1. P. 3–15. DOI: 10.1080/00423114.2013.874564.
- Абдурашитов А. Ю., Крысанов Л. Г., Каменский В. Б. Профильное шлифование рельсов. М.: Транспорт, 2001. 79 с.
- ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 54 с.
- Воробьев А. А., Конограй О. А. Сопоставление территориальных филиалов ОАО «РЖД» по условиям эксплуатации колесных пар подвижного состава // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2015. № 21. С. 98–107.
- Archard J. F. Elastic deformation and the laws of friction // Proc. of the Royal Society of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sciences. 1957. Vol. 243. No. 1233. P. 190–205.
- Орлова А. М., Федорова В. И. Анализ существующей ситуации взаимодействия колес и рельсов. Постановка задач исследования // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 6–10 июля 2016 г.). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. С. 121–123.
- Орлова А. М., Федорова В. И. Теоретический расчет ресурса поверхности катания колес на основе экспериментальных наблюдений за вагонами модели 12-9853 на тележках 18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс // Известия ПГУПС. 2017. Т. 14. Вып. 4. С. 664–672.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ОРЛОВА Анна Михайловна,
 д-р техн. наук, заместитель генерального директора
 по научно-техническому развитию, ПАО «НПК ОВК»

САВУШКИНА Юлия Викторовна,
канд. экон. наук, директор дирекции аналитических исследований, ООО «ВНИЦТТ»

ФЕДОРОВА Вероника Игоревна,
аспирант, кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,

ФГБОУ ВО ПГУПС; инженер-конструктор ДПХЧ,
ООО «ВНИЦТТ»

Статья поступила в редакцию 17.11.2018 г., актуализирована
17.01.2019 г., принята к публикации 30.01.2019 г.

Modelling car motion and the calculation of the wear of wheels with the VNITsTT rolling surface profile

A. M. ORLOVA¹, Yu. V. SAVUSHKINA², V. I. FEDOROVA²

¹Public Joint-Stock Company "Research and Production Corporation "United Wagon Company" (PJSC "RPC UWC"), Moscow, 115184, Russia

²Limited Liability Company "Russian Research Center for Transport Technologies" (LLC "VNITsTT"), St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract. The wear problem of wheels along rolling surface or thin flange is currently involved a large circle of specialists. There are opinions that it is necessary to establish new limit values for wheel wear in operation, put into practice the re-profiling (profile grinding) of rails, install a larger number of floor-mounted lubricators in places of increased rail wear intensity, but one of the priority direction in this area is the development of a new surface rolling wheel profile for freight cars, the use of which will help to increase the turnaround time and increase the service life of the wheels in operation. Geometry of the rolling surface profile of the wheel should allow to provide a contact form between the wheel and the rail conformal or close to conformal. This solution has already found its application and achieved desired results on foreign railways (North America, South Africa, China, etc.). Authors developed a technique for designing a new wheel profile, which was used to build a profile of the rolling surface made by the Russian Research Center for Transport Technologies (LLC "VNITsTT"). As part of the study, calculations were carried out using the method of mathematical modeling of a freight car motion in the MEDYNA software package and performance indicators were evaluated on the VNITsTT rolling surface profile in comparison with the profile made according to GOST 10791–2011, and the wheel wear rate produced on the section of the track close to the average network operating conditions. Additionally, critical speed of the sinuous motion of the car was evaluated, which showed that despite the increased equivalent taper, the critical speed remained almost unchanged (an increase of 6 %). Theoretical calculation of the wheel resource based on the results of mathematical modeling has been made. According to the calculations, it was determined that the resource of the flange before turning for the RDCTT profile is 409.3 thousand km, and for the rolling surface — 663.3 thousand km, for the profile made according to GOST 10791–2011, the resource for the flange was 285.6 thousand km, and for the rolling surface 401.2 thousand km. Thus, the use of the VNITsTT profile is more effective than the profile made according to GOST 10791–2011 by 30.2 % for the flange and 39.5 % for the rolling surface. The developed VNITsTT profile, in comparison with the profile made by GOST 10791–2011, according to the results of calculations, confirmed the provision of standard indicators of the dynamic qualities of a freight car.

Keywords: rolling surface profile of the wheel; railway wheel; freight car; motion modelling; wear modelling

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-41-47>

REFERENCES

1. Orlova A. M., Savushkin R. A., Fedorova V. I. *Razrabotka uluchshennogo profilya kolea dlya gruzovogo vagona. Teoreticheskoe obosnovanie* [Development of an improved wheel profile for a freight car. Theoretical justification]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-269-279>.

2. Saidova A. V., Orlova A. M. *Razrabotka matematicheskikh modeley vagonov na telezhkakh 18-9810 i 18-9855 dlya issledovaniya iznosov koles* [Development of mathematical models of cars on trucks 18-9810 and 18-9855 for the study of wheel wear]. Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta [Science and transport progress. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2013, no. 2 (44), pp. 118–123.

3. Saidova A., Orlova A. *Refining the parameters of Archard's wear model for calculating wear of wheels applied for 25 t per axle freight cars on Russian railways*. Vehicle System Dynamics, 2014, Vol. 52, Issue: sup 1, pp. 3–15. DOI: 10.1080/00423114.2013.874564.

4. Abdurashitov A. Yu., Krysanov L. G., Kamenskiy V. B. *Profil'noe shlifovanie rel'sov* [Rail profile grinding]. Moscow, Transport Publ., 2001, 79 p.

5. GOST 33211–2014. *Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities*. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (in Russ.).

6. Vorob'ev A. A., Konogray O. A. *Sopostavlenie territorial'nykh filialov OAO "RZD" po usloviyam ekspluatatsii kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Comparison of the territorial branches of the JSC "RZD" on the conditions of operation of wheelsets of rolling stock]. Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii [New materials and technologies in mechanical engineering], 2015, no. 21, pp. 98–107.

7. Archard J. F. *Elastic deformation and the laws of friction*. Proc. of the Royal Society of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sciences, 1957, Vol. 243, no. 1233, pp. 190–205.

8. Orlova A. M., Fedorova V. I. *Analysis of the existing situation of the interaction of wheels and rails. Setting research objectives*. Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects: materials of the XI Intern. scientific and technical conf. (St. Petersburg, July 6–10, 2016). St. Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, pp. 121–123.

9. Orlova A. M., Fedorova V. I. *Theoretical calculation of the rolling surface life of wheels based on experimental observations of model 12-9853 cars on 18-9855 bogies with axle load of 25 tf*. Proceedings of Petersburg Transport University, 2017, Vol. 14, no. 4, pp. 664–672.

ABOUT THE AUTHORS

Anna M. ORLOVA,

Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for technical and scientific development, RPC UWC

Yuliya V. SAVUSHKINA,

Cand. Sci. (Econ.), Director of the Analytical Research Directorate, LLC "VNITsTT"

Veronika I. FEDOROVA,

Post-graduate, Department "Cars and car facility", FGBOU VO PGUPS; Design Engineer, LLC "VNITsTT"

Received 17.11.2018

Revised 17.01.2019

Accepted 30.01.2019

■ E-mail: vfedorova@tt-center.ru (V. I. Fedorova)

Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода

Д. В. ЕРМОЛЕНКО¹, Л. Ю. ЮФЕРЕВ², О. А. РОЩИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Москва, 109428, Россия

Аннотация. Представлены результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода при организации движения поездов в сложных зимних климатических условиях.

В эксперименте использовалась резонансная однопроводная система передачи электрической энергии для питания индукционных нагревателей рельсов стрелочного перевода. Проведены замеры электрических и тепловых параметров индукционной нагревательной системы. Рассмотрены ее преимущества перед системой нагрева рельсов трубчатыми электронагревательными элементами. Разработанное оборудование действует по принципу «прямого нагрева», что позволяет увеличить скорость нагрева или уменьшить потребление электроэнергии при той же скорости нагрева электронагревательными элементами. Имеется возможность применения одного силового преобразователя для нескольких стрелочных переводов, а также использования предлагаемой системы в северных регионах — за счет большей температуры нагрева в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии.

Ключевые слова: резонансная однопроводная система; преобразователь частоты; резонансный контур; индукционный нагрев рельсов и стрелок; активная энергия; реактивная энергия; токи Фуко; нагрев при помощи ТЭН

Введение. Революционные изменения в электро-технике, обусловленные появлением современной силовой электроники, цифровой и аналоговой систем управления, позволили создать резонансную однопроводную систему передачи электрической энергии на повышенной частоте. Резонансная система передачи дает возможность развития инновационной технологии нагрева индукционным способом за счет возбуждения электрических токов повышенной частоты переменным электромагнитным полем [1, 2, 3].

В ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ), а с 2016 г. в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) ведутся разработки резонансной системы передачи электрической энергии по однопровод-

ной кабельной или воздушной линии на повышенной частоте [1, 2, 3, 4]. Начало разработок было положено в 1992 г. С 2012 г. выполняется совместное исследование резонансных систем учеными ВИЭСХ и ВНИИЖТ.

Во время выпадения осадков в виде снега, а также в периоды перепадов температуры велика вероятность образования наледей, препятствующих свободному перемещению стрелок. Для исключения этого снег убирают вручную, обдувают сжатым воздухом или применяют трубчатые электронагревательные элементы (ТЭН) для плавления снега и льда. При этом известно, что КПД индукционного нагрева выше по сравнению с нагревом при помощи ТЭН [5, 6, 7].

Целью проекта была разработка и создание оборудования для индукционного нагрева рельсов и стрелок на основе резонансной системы передачи электроэнергии по одному проводу на повышенной частоте и, как следствие, увеличение КПД системы удаления снега на стрелочных переводах (СП).

Задачей проекта являлось улучшение конструкции устройства для нагрева рельсов и стрелок до заданной температуры в автоматическом режиме путем использования устройства индукционного нагрева с удаленным генератором повышенной частоты, позволяющего уменьшить потребление электроэнергии.

Преимущества и возможности предлагаемого технического решения:

- низкий уровень электромагнитного излучения;
- большое расстояние между генератором и индукторами;
- уменьшение расходов электроэнергии;
- нагрев только рельса, а не нагревательного элемента;
- увеличение скорости нагрева;
- автоматическое включение-выключение.

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (Д. В. Ермоленко)

Схема устройства для индукционного нагрева рельсов и стрелок, в котором индукторы включены последовательно к однопроводной линии электропередачи [8], представлена на рис. 1.

Схема работает следующим образом: частота напряжения питающей электросети повышается генератором частоты 1 до уровня 1–100 кГц. Затем напряжение подается на резонансный повышающий трансформатор 3, через емкость 2, где повышается. С выхода резонансного повышающего трансформатора напряжение подается в однопроводную линию электропередачи 4, к которой последовательно подключены индукторы 6 с суммарным рабочим напряжением, равным выходному напряжению повышающего трансформатора 3. Индукторы устанавливаются на нагреваемом рельсе 9 с зазором или без него. Автоматическое управление осуществляется внешним датчиком состояния окружающей среды 5, который подает сигнал включения преобразователя частоты.

Принципиальная схема устройства для индукционного нагрева рельсов и стрелок, в котором индукторы включены параллельно к однопроводной линии электропередачи через понижающий трансформатор, представлена на рис. 2.

Схема работает следующим образом: частота напряжения питающей электросети повышается генератором частоты 1 до уровня 1–100 кГц. Затем подается на резонансный повышающий трансформатор 3, через емкость 2, где повышается. С выхода резонансного повышающего трансформатора напряжение подается в однопроводную линию электропередачи 4, к которой подключается понижающий трансформатор 5, к его выходной обмотке параллельно подключены индукторы 6, при этом выходное напряжение понижающего трансформатора 5 соответствует рабочему напряжению индукторов, которые устанавливаются на нагреваемом рельсе 9 с зазором или без него. Автоматическое управление осуществляется внешним датчиком состояния окружающей среды 10, который подает сигнал включения преобразователя частоты.

Индукторы выполнены на основе ферритовых или металлических сердечников с изолированной обмоткой.

Экономия электроэнергии осуществляется за счет использования индукционного нагрева и автоматического управления, которое включает нагрев только при срабатывании датчиков наличия снега или льда на рельсах. Мощность, затрачиваемая на нагрев, может составлять от 100 до 500 Вт/м, при этом рельс нагревается на 30–100 °С.

Лабораторные испытания (рис. 3) показали возможность и целесообразность применения нагрева индукционным способом на основе резонансной системы передачи электроэнергии на повышенной ча-

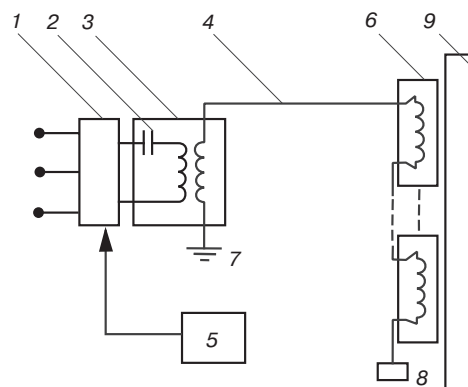


Рис. 1. Резонансная система индукционного нагрева с последовательным включением индукторов:
1 — генератор повышенной частоты; 2 — емкость;
3 — резонансный повышающий трансформатор;
4 — однопроводная линия электропередачи; 5 — внешний датчик состояния окружающей среды; 6 — индукторы; 7, 8 — заземление;
9 — нагреваемый рельс

Fig. 1. Resonant induction heating system with serial connected inductors:
1 — high frequency generator; 2 — capacity;
3 — resonant step-up transformer; 4 — single-wire power line;
5 — external environmental sensor; 6 — inductors;
7, 8 — earthing; 9 — heated rail

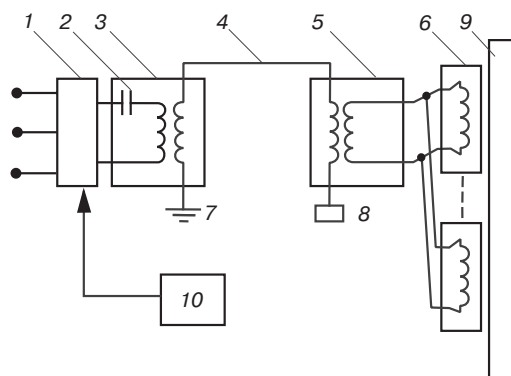


Рис. 2. Резонансная система индукционного нагрева с параллельным включением индукторов:
1 — генератор повышенной частоты; 2 — емкость;
3 — резонансный повышающий трансформатор;
4 — однопроводная линия электропередачи;
5 — понижающий трансформатор;
6 — индукторы; 7, 8 — заземление; 9 — нагреваемый рельс;
10 — внешний датчик состояния окружающей среды

Fig. 2. Resonant induction heating system with parallel connected inductors:
1 — high frequency generator; 2 — capacity;
3 — resonant step-up transformer; 4 — single-wire power line;
5 — step-down transformer;
6 — inductors; 7, 8 — earthing; 9 — heated rail; 10 — external environmental sensor

стоте. Индукционный нагрев осуществляется за счет наведения вихревых электрических токов переменным электромагнитным полем. При индукционном нагреве нагревается только токопроводящее тело, а не нагревательный элемент. В поверхностном слое, называемом глубиной проникновения, выделяется 86 %

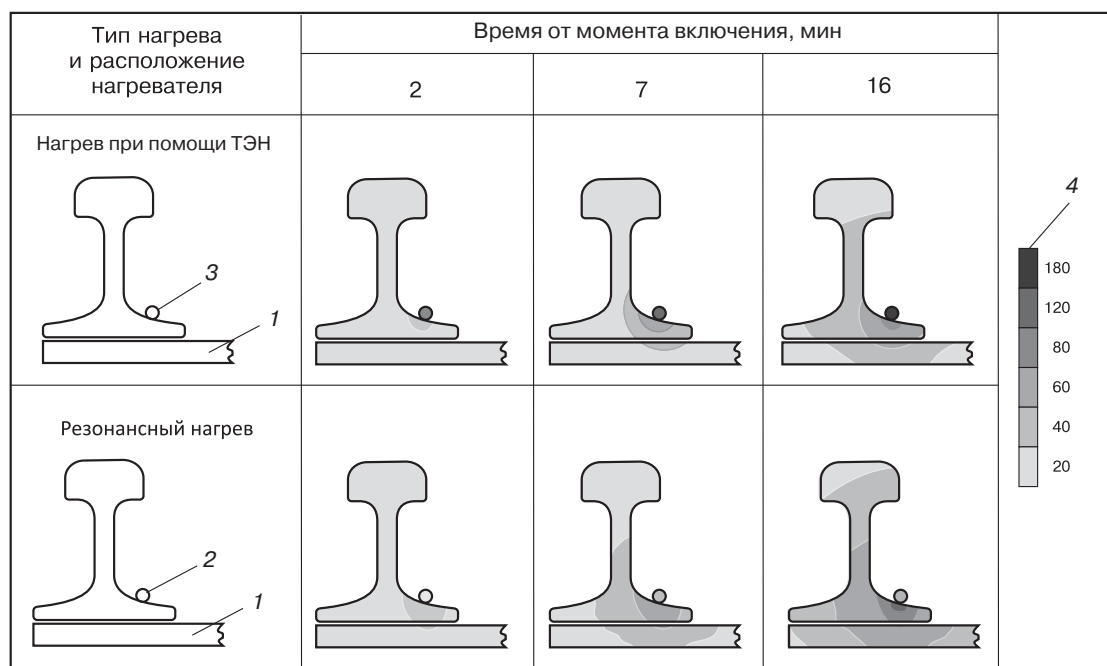


Рис. 3. Зоны теплового распределения при системах нагрева:
1 — подошва рельса; 2 — индуктор; 3 — нагреватель; 4 — шкала температуры, °C

Fig. 3. Zones of thermal distribution with heating systems:
1 — rail foot; 2 — inductor; 3 — heater; 4 — temperature scale, °C

всей мощности, что позволяет экономить электро-энергию. При резонансе используется активная и реактивная энергия.

Основные технические характеристики инновационной системы индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода на основе резонансной системы передачи электроэнергии по одному проводу на повышенной частоте:

- напряжение и частота питания передающего преобразователя — 380 В, 50 Гц;
- выходная мощность передающего преобразователя — 6–20 кВт;
- напряжение в линии электропередачи — менее 1 кВ;
- габаритные размеры передающего преобразователя — 500×400×350 мм;

Таблица 1

Результаты испытаний по первой схеме (рис. 1) линия — индукторы

Table 1

Test results for the first scheme (fig. 1) line — inductors

Напряжение на выходе генератора, В	Ток на выходе генератора, А	Частота, кГц	Напряжение в линии электропередачи, В	Ток в линии электропередачи, А	Напряжение на входе индуктора, В	Ток на входе индуктора, А	Выходная мощность на индукторе, Вт
300	4,0	9,0	400	3,0	100	3,0	300

Таблица 2

Результаты испытаний по второй схеме (рис. 2) линия — понижающий трансформатор — индукторы

Table 2

Test results for the second scheme (fig. 2) line — step-down transformer — inductors

Напряжение на выходе генератора, В	Ток на выходе генератора, А	Частота, кГц	Напряжение в линии электропередачи, В	Ток в линии электропередачи, А	Напряжение на входе индуктора, В	Ток на входе индуктора, А	Выходная мощность на индукторе, Вт
300	4,0	9,0	950	1,3	100	3,0	300

- длина линии электропередачи от передающего преобразователя до места нагрева — до 1500 м;
- удельная мощность нагрева рельса — 500 Вт/м;
- повышение температуры рельса — до 50 °С.

В ФГБНУ ВИЭСХ были проведены испытания опытного оборудования резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии для индукционного нагрева рельсов стрелочного перевода при организации движения поездов в сложных зимних климатических условиях. Целью испытаний было определение основных технических характеристик оборудования однопроводной системы передачи электроэнергии. Результаты испытаний по первой схеме линия — индукторы (рис. 1) представлены в табл. 1.

Результаты испытаний по второй схеме линия — понижающий трансформатор — индукторы (рис. 2) представлены в табл. 2.

Главный недостаток системы нагрева при помощи ТЭН заключается в том, что это нагреватель косвенного нагрева: спираль — корпус — среда (рельс). При его работе вероятно выпаривание смазки из зоны острия СП. При контактном способе передачи тепла возможны размыкания, низкая эффективность энергозатрат, локальный перегрев ТЭН, приводящий к их перегоранию. Высока чувствительность к механическому воздействию, например при ручной и механизированной очистке пути, и к вибрациям (от прохождения подвижного состава). Для ТЭН характерны низкая надежность и относительно малый срок службы. В случае отказа электрозащиты устройства опасны для людей и СЦБ, так как рабочее напряжение — 220 В. Высокое энергопотребление и плохое испарение талого снега делает неэффективным использование нагрева при помощи ТЭН в северных регионах и для высокоскоростного движения.

Рассмотрим преимущества индукционного нагрева в резонансном режиме, при котором принципиально меняется философия нагрева элементов СП. Обогрев элементов СП обеспечивается бесконтактным способом, при этом снижается расход электроэнергии за счет прямого нагрева, автоматической проверки отсутствия наледи и периодического отключения обогрева. Снижается энергоемкость и уменьшаются габариты электрооборудования за счет передачи электрической энергии на повышенной частоте в резонансном режиме. Сокращаются расходы, связанные с текущим обслуживанием, например, не требуются громоздкие шкафы с силовым оборудованием в путевом развитии станции. Индукторы обладают высокой надежностью и продолжительным сроком службы. Появляется возможность применения одного силового преобразователя для несколь-

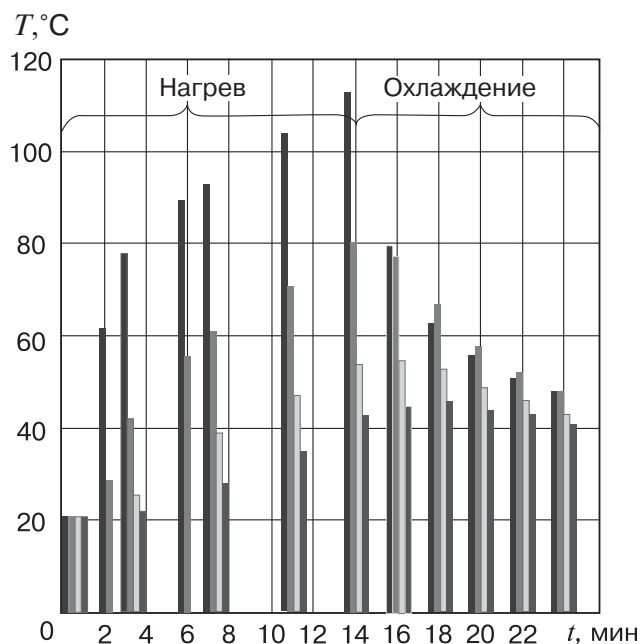


Рис. 4. Сравнение скорости нагрева рельса резонансной индукционной системой и ТЭН с одинаковой мощностью 500 Вт/м (1–14-я мин) и скорости охлаждения (14–24-я мин). Расположение датчиков на рельсе, соответствующие им показания на гистограмме:

■ сбоку напротив ТЭН; ■ сбоку напротив индуктора;
■ снизу под ТЭН; ■ снизу под индуктором

Fig. 4. Comparison of the heating rate of the rail by a resonant induction system and TЭН with the same power of 500 W/m (1–14 minutes) and the cooling rate (14–24 minutes). Location of the sensors on the rail, corresponding readings on the histogram:

■ side opposite TЭН; ■ side opposite the inductor;
■ below the TЭН; ■ below the inductor

ких стрелочных переводов, повышается уровень электробезопасности. Система индукционного нагрева подходит для использования на линиях с высокоскоростным движением за счет быстрого нагрева узлов СП до необходимой температуры, а также для применения в северных регионах благодаря более высокой температуре нагрева узлов СП в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии.

Сравнение скорости нагрева рельса резонансной индукционной системой и ТЭН одинаковой мощностью 500 Вт/м и скорости охлаждения представлено на рис. 4.

Данные, полученные в ходе испытаний (рис. 5), показали, что при нагреве с помощью ТЭН температура испытываемого рельса достигла 80 °С снизу под ТЭН (14-я мин) и 46 °С сбоку напротив ТЭН (18-я мин). При индукционном нагреве температура снизу под индуктором — 114 °С и 55 °С — сбоку напротив индуктора (16-я мин).



Рис. 5. Вид обогреваемого стрелочного перевода
Fig. 5. Type of heated switch

Заключение. Разработанное оборудование действует по принципу «прямого нагрева», что позволяет увеличить скорость нагрева или уменьшить потребление электроэнергии при той же скорости нагрева с помощью ТЭН. Имеется возможность применения одного силового преобразователя на несколько стрелочных переводов. Благодаря большей температуре нагрева в сочетании с относительно малым потреблением электроэнергии подходит для использования в северных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермоленко Д. В., Юферев Л. Ю., Рошин О. А. Результаты испытаний резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии на объекты инфраструктуры ОАО «РЖД» // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-295-300>.
2. Юферев Л. Ю., Рошин О. А., Александров Д. А. Основные проблемы и их устранение при проектировании РОС // Инновации в сельском хозяйстве. 2013. № 1 (3). С. 18–24.

3. Юферев Л. Ю., Стребков Д. С., Рошин О. А. Экспериментальные модели резонансных систем электрической энергии. М.: ВИЭСХ, 2010. 180 с.

4. Электрификация транспорта на переменном токе промышленной частоты повышенного напряжения / сост. под руководством акад. М. П. Костенко. М.: АН СССР, 1957. 35 с. (Вопросы советской науки).

5. Кочубей В. Ф., Евдокимов И. А. Электрообогрев стрелочных переводов, защита от снега и льда [Электронный ресурс] // Путь и путевое хозяйство: сайт для студентов и работников путевого хозяйства. URL: <https://rzd-puteetz.ru/elektroobogrev-strelochnyhperevodov/> (дата обращения: 31.10.2018 г.).

6. Устройство для очистки стрелочного перевода от снега и льда путем электрообогрева «СЭИТ-04М»: пат. на полезную модель № 141261 ФИПС (Роспатент): МПК E01B/ А. И. Лучкив [и др.]. Опубл. 27.05.2014. Бюл. № 15.

7. Устройство для очистки стрелочного перевода от снега и льда путем электрообогрева: пат. № 2415988. ФИПС (Роспатент): МПК E01B7/24/ Ю. М. Иньков [и др.]. Опубл. 10.04.2011. Бюл. № 10.

8. Устройство для индукционного нагрева рельсов и стрелок (варианты): пат. на полезную модель № 135655. ФИПС (Роспатент): МПК E01B31/18 / Д. В. Ермоленко [и др.]. Опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕРМОЛЕНКО Дмитрий Владимирович,
д-р техн. наук, доцент, заведующий аспирантурой,
АО «ВНИИЖТ»

ЮФЕРЕВ Леонид Юрьевич,
д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

РОШИН Олег Алексеевич,
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Статья поступила в редакцию 09.11.2018 г., принята к публикации 21.01.2019 г.

Test results of the resonant single-wire power transmission system for induction heating of the switch rail

D. V. ERMOLENKO¹, L. Yu. YUFEREV², O. A. ROSHCHIN²

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM", (FGBNU FSAEC VIM), Moscow, 109428, Russia

Abstract. The article provides results of tests of a resonant single-wire power transmission system for induction heating of a switch rail in the organization of train traffic in difficult winter climatic conditions.

Laboratory tests have shown the possibility and feasibility of applying heating by an induction method based on a resonant system for transmitting electricity at an increased frequency. Induction heating occurs in the metal due to the excitation of electric currents by an alternating electromagnetic field. With induction heating, only the conductive body is heated, and not the heating element. In the surface layer, called the penetration depth, 86 % of the total power is released, which saves energy. At resonance, active and reactive energy is used.

In the experiment a resonant single-wire system for transmitting electrical energy was used to power the induction heaters of the switch rail. Electrical and thermal parameters of the induction heating system were measured. Its advantages over the rail heating system with tubular electric heating elements (TEH) are considered.

Developed equipment operates according to the principle of "direct heating", which allows to increase the heating rate or reduce electricity consumption at the same heating rate as compared to TEH. It is possible to use one power converter for several switches. Due to its higher heating temperature combined with relatively low power consumption, it is suitable for use in the northern regions.

Developed equipment is connected to AC network with a voltage of 380 V and 50 Hz, operating frequency range is 6–10 kHz, power

consumption for heating a single object is 6–20 kW, and the voltage on the transmission line is less than 1 kV.

Keywords: resonant single-wire system; frequency converter; resonant circuit; induction heating; active energy; reactive energy; Foucault's currents; heating by TEH heaters

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-48-53>

REFERENCES

1. Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A. *Rezultaty ispytaniy rezonansnoy odnoprovodnoy sistemy peredachi elektroenergii na ob'ekty infrastruktury OAO "RZD"* [Test results of resonant single wire system transmitting power to the infrastructure objects of the JSC "RZD"]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-295-300>.

2. Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Aleksandrov D. A. *Osnovnye problemy i ikh ustraneniye pri proektirovaniy ROS* [The main problems and their elimination in the design of ROS]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2013, no. 1 (3), pp. 18–24.

3. Yuferev L. Yu., Strebkov D. S., Roshchin O. A. *Ekspериментал'nye modeli rezonansnykh sistem elektricheskoy energii* [Experimental models of resonant systems of electrical energy]. Moscow, VIESKh Publ., 2010, 180 p.

4. Kostenko M. P. *Elektrifikatsiya transporta na peremennom toke promyshlennoy chastoty povyshennogo napryazheniya* [Electrification of transport on alternating current of industrial frequency overvoltage]. Moscow, AN SSSR Publishing house, 1957, 35 p.

■ E-mail: Ermolenko.Dmitry@vniizht.ru (D. V. Ermolenko)

5. Kochubey V. F., Evdokimov I. A. *Electrical heating of turnouts, protection from snow and ice*. Tracks and track facilities: site for students and specialists of track facilities. URL: <https://rzd-puteetz.ru/elektroobogrev-strelochnyh-perevodov/> (retrieved on 31.10.2018) (in Russ.).

6. Luchkiv A. I., Ioannidi S. A., Mits S. Yu. *Device for cleaning switch from snow and ice by electrical heating "SEIT-04M"*. Utility patent no. 141261. Moscow, Rospatent, 2014. (in Russ.).

7. In'kov Yu. M., Simonov M. D., Shabalin N. G., Feoktistov V. P. *Device for cleaning switch from snow and ice by electrical heating*. Patent no. 2415988. Moscow, Rospatent, 2011. (in Russ.).

8. Ermolenko D. V., Yuferev L. Yu., Roshchin O. A., Kirin O. Yu. *Device for induction heating of rails and switches (options)*. Utility patent no. 135655. Moscow, Rospatent, 2013. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy V. ERMOLENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Post-Graduate Department, JSC "VNIIZhT"

Leonid Yu. YUFEREV,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Oleg A. ROSHCHIN,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, FGBNU FSAEC VIM

Received 09.11.2018

Accepted 21.01.2019

ДЕЛОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Программное обеспечение (ПО) «Система экспресс-оценки коэффициента теплопередачи транспортных средств» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618464 от 01.08.2017) разработано с целью оперативного получения и предоставления информации о соответствии теплотехнического состояния кабин машинистов локомотивов, кузовов изотермических и пассажирских вагонов, моторвагонного подвижного состава, скоростных поездов, а также вагонов метро и автофургонов требованиям НТД.

Область применения ПО

- при проведении предварительных, приемочных, периодических и типовых испытаний в соответствии с ГОСТ 33661–2015;
- при введении транспортного средства в эксплуатацию и проведении ремонта кузова в соответствии с ТУ на тип подвижного состава;
- при введении транспортного средства в эксплуатацию; периодически, но не реже одного раза в 6 лет; по требованию компетентных органов каждой стороны в соответствии с Соглашением о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС).

Перспективы применения ПО

- переход от выборочного к сплошному контролю коэффициента теплопередачи кузова теплоизолированного транспортного средства;
- ведение онлайн электронного теплотехнического паспорта;
- помаршрутное и посезонное планирование энергопотребления;
- мониторинг энергетических потерь и их сокращение на 10–15 %;
- время проведения теплотехнических испытаний по определению величины коэффициента теплопередачи не более 6 ч.



Информация о разработке опубликована в журнале «Вестник ВНИИЖТ»: 2017, Т. 76, № 5; 2018, Т. 77, № 1; можно ознакомиться на сайте издания: <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

Контактная информация: АО «ВНИИЖТ» (<http://www.vniizht.ru/>), E-mail: naumenko.sergei@vniizht.ru; тел. +7(499)260-41-14.

Оценка средней наработки до отказа поворотных подножек по данным эксплуатации

М. В. БЕЛОУСОВА, В. В. БУЛАТОВ

Открытое акционерное общество «Производственная фирма «КМТ» — Ломоносовский опытный завод» (ОАО «ПФ» КМТ), Ломоносов, 198412, Россия

Аннотация. В статье приведены обоснованные доводы в пользу того, что статистические данные по наработке до отказа поворотных подножек на пассажирских вагонах локомотивной тяги более точно характеризуются законом распределения Вейбулла, чем нормальным. Для подтверждения был применен статистический критерий проверки отклонения распределения от нормального. Для идентификации параметров распределения Вейбулла, на основе которых рассчитывается значение точечной оценки средней наработки до отказа, использовался метод максимального правдоподобия.

Данный закон распределения и процесс нахождения его параметров целесообразно ввести в программу и методику оценки эксплуатационной надежности при расчете оценки средней наработки до отказа поворотных подножек, а также рассмотреть возможность его применения для изделий-аналогов. В соответствии с принятым законом распределения произведен расчет точечной оценки средней наработки до отказа подножки поворотной закрытой на основе эксплуатационных испытаний за один год.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность; вагоны локомотивной тяги; поворотная подножка; показатели надежности; средняя наработка до отказа; распределение Вейбулла; метод максимального правдоподобия

Введение. Поворотные подножки устанавливаются на пассажирские вагоны локомотивной тяги производства ОАО «ТВЗ» и предназначены для удобного и безопасного прохода пассажиров, возможности посадки в вагон с земли и с высоких и низких платформ. В настоящее время поворотными подножками оборудуются пассажирские вагоны поездов локомотивной тяги моделей 61-4447, 61-4440, 61-4463, 61-4458 и др.

Подножки могут устанавливаться на вагоны с распашными дверями и дверями прислонно-сдвижного типа. Подножка (рис. 1) состоит из корпуса 1, площадки откидной 2 и блока поворотного 3. Площадка откидная соединена с блоком поворотным толкателем 4, обеспечивающим синхронный поворот откидной площадки и блока поворотного на 90°.

В соответствии с ГОСТ 27.003–2016 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» (введен в действие 01.09.2017 г.) подножки классифицируются как изделие конкретного назначения (КН) многократного циклического применения, отказы или переход в предельное состояние которого не приводят к последствиям ката-

строфического (критического) характера, восстанавливаемое и обслуживаемое в процессе эксплуатации, стареющее и изнашиваемое одновременно до перехода в предельное состояние или отказ. Для подножки отказом принято считать прекращение выполнения заданных функций — открытия и закрытия, фиксации из-за нарушения работоспособности элементов конструкции.

Оценка показателей надежности подножек осуществляется по программе и методике, согласованным с заказчиком, и проводится параметрическим методом на основе обрабатываемых статистических данных эксплуатационных наблюдений.

К данному моменту на предприятии ОАО «ПФ» «КМТ» накоплен опыт серийного производства подножек (с 2008 г.), а также выявлены основные причины отказов изделия, что дает возможность провести уточненную оценку закона распределения.

Определение закона распределения отказов. Целью данного исследования является определение закона распределения наработок до отказа поворотных подножек, который более точно описывает результаты наблюдений в эксплуатации, и последующий вывод численных выражений для расчета показателя безотказности на основе выбранного закона распределения. Исследование закономерностей появления неисправностей, являющихся случайными событиями, — один из основных вопросов надежности [1, 2, 3, 4]. Чаще всего для непрерывных величин в теории надежности используются нормальный, экспоненциальный и закон распределения Вейбулла.

Если экспоненциальный закон распределения можно явно выделить и связать его со спецификой изделия, то аналогично поступить с прочими двумя законами не всегда возможно. Корректный выбор закона распределения для каждого технического изделия позволяет осуществлять текущий расчет показателей надежности, прогнозировать их, а также разрабатывать превентивные меры для конкретного изделия и нивелировать издержки как на этапах производства, так и в процессе эксплуатации.

При анализе показателей надежности из предположения о нормальном законе распределения отказов

■ E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru (В. В. Булатов)

была сформирована однородная выборка из наработок за все время фиксации данных (рассматривались подножки одинаковой конструкции).

После этого были вычислены значения показателей асимметрии g_1 и эксцесса g_2 по формулам [5]:

$$g_1 = \frac{m_3}{m_2^{1,5}} = -0,291389; \quad (1)$$

$$g_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = -0,769712, \quad (2)$$

где m_2, m_3, m_4 — центральные моменты второго, третьего и четвертого порядков соответственно. В контексте нормального распределения $g_1 = 0, g_2 = 0$. В нашем случае показатель асимметрии $g_1 = -0,291389 < 0$, из чего следует, что «длинная» часть кривой распределения расположена слева от вершины. Коэффициент эксцесса — мера плосковершинности (остроконечности) графика распределения измеряемого признака, в данном случае $g_2 = -0,769712 < 0$, значит, кривая распределения имеет более пологую вершину, чем кривая нормального распределения. В результате была выполнена проверка нормальности распределения по критерию Дэвида — Хартли — Пирсона с вычислением статистики U [5, 6], используя размах варьирования R :

$$U = \frac{R}{s}; \quad (3)$$

$$R = t_{\max} - t_{\min}; \quad (4)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2, \quad (5)$$

где s^2 — несмещенная оценка дисперсии; $t_{\max}, t_i, t_{\min}, \bar{t}$ — максимальное, i -е, минимальное и среднее значения рассматриваемой выборки наработок до отказа; n — общее число наработок до отказа. Гипотеза о нормальности отвергается, если значение статистики $U < U_{0,5a}$ или $U > U_{1-0,5a}$, где $U_{0,5a}, U_{1-0,5a}$ — критические точки для статистики U . При уровне значимости 0,1 процентные точки статистики $U/U_{0,5a} = 3,958, U_{1-0,5a} = 5,508$. Таким образом, поскольку значение $U = 3,81 < U_{0,5a}$, гипотезу о нормальном законе распределения наработки следует отвергнуть.

Далее используем графическое представление статистического ряда (гистограмму), которое дает возможность сделать предположение о законе распределения наработок и произвести их дальнейший анализ. Для этого чаще всего используется ряд программных средств, например: Excel, Statistica, R, Python, Mathcad и др. [7, 8].

В программной среде для статистического анализа была проведена работа по определению наиболее подходящего закона распределения по заданной выборке. В результате данного анализа было выявлено (рис. 2, таблица), что более точно средняя наработка

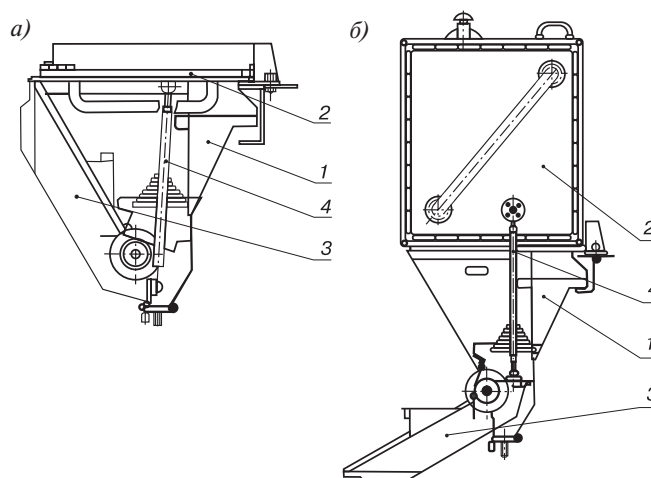


Рис. 1. Подножка поворотная закрытая:
а — положение «закрыто»; б — положение «открыто»; 1 — корпус;
2 — площадка откидная; 3 — поворотный блок; 4 — толкатель

Fig. 1. Closed turning step:
а — position “closed”; б — position “open”; 1 — case; 2 — folding area;
3 — turning block; 4 — pusher

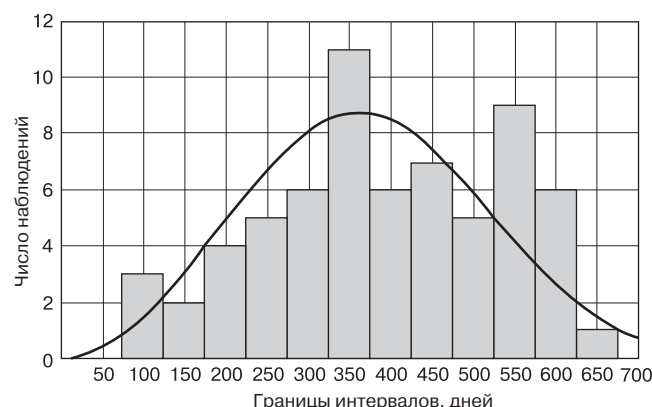


Рис. 2. Гистограмма частот по выборке наработок до отказа поворотных подножек
Fig. 2. Histogram of frequencies on a sample of developments to the failure of the rotary steps

до отказа описывается законом распределения Вейбулла (с параметрами масштаба и формы 420 и 2,85 соответственно). Помимо этого, P -значение (p -value) выборки по критерию согласия χ^2 составило 0,94, что говорит об обоснованности данного предположения. P -значение позволяет судить о том, насколько данная выборка соответствует теоретическому распределению, так как, по сути, представляет собой вероятность истинности нулевой гипотезы. Проверяемую гипотезу H_0 нет основания отвергнуть, если p -value $> \alpha$ [7]. Так как в данном исследовании используется уровень значимости $\alpha = 0,05$, то при полученном P -значении есть основания принять гипотезу о распределении Вейбулла. Итак, для оценки средней наработки до отказа необходимо определить параметры этого распределения.

Сравнение законов распределения по критериям χ^2 и P -значения
Comparison of the distribution laws for the criteria χ^2 and p -value

Типы распределения	χ^2 и p -value
Вейбулла (масштаб, форма)	0,938448
Нормальное (положение, масштаб)	0,679369
Обобщенное распределение экстремальных значений (положение, масштаб, форма)	0,282102
Рэлея (масштаб)	0,269219
Обобщенное распределение Парето (масштаб, форма)	0,022862
Треугольное (минимум, максимум, мода)	0,005468
Логнормальное (масштаб, форма)	0,000616
Полунормальное (масштаб)	0,000000

Нахождение параметров распределения Вейбулла для расчета оценки средней наработки до отказа. В настоящее время основным документом при анализе надежности изделий в эксплуатации является [9]. В нем приводятся математические соотношения для расчета как точечных, так и интервальных оценок показателей надежности. Однако данный документ изобилует большим количеством опечаток и неточностей. Помимо этого, представленные там методы нахождения численных соотношений для расчета показателей надежности из предположений о различных законах распределения и всевозможных планах проведения испытаний на надежность вызывают сомнения в их корректности и затруднения в процессе применения.

При расчете оценки средней наработки до отказа на основе данных эксплуатации значение, полученное в результате вычислений по формулам из [9, с. 45], оказалось неадекватным. При дальнейшем рассмотрении данных численных выражений и их анализе было принято решение о выведении соотношений для вычисления параметров распределения Вейбулла методом максимального правдоподобия.

Для N изделий рассмотрим совокупность наработок до отказа t_i , расположенных в порядке неубывания:

$$t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < T,$$

где T — продолжительность испытаний; n — число отказов за T .

Тогда выражение для вероятности с ограничением длительности T имеет вид

$$P = f(t_1)f(t_2), \dots, f(t_i), \dots, f(t_n)\Delta t_1 \times \times \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n (1 - F(T))^{N-n}, \quad (6)$$

где P — вероятность реализации в ходе испытаний выборки наработок, включающей наработки до отказа

из числа фиксированных значений $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n < T$ и наработки, усеченные временем испытаний T , в количестве $(N - n)$, где N — объем выборки; n — число наработок до отказа в этой выборке, что равносильно

$$\frac{P}{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n} = \prod_{i=1}^n f(t_i) (1 - F(T))^{N-n}. \quad (7)$$

Тогда функция правдоподобия будет иметь следующий вид:

$$L = \ln \frac{P}{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots, \Delta t_n} = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + \ln (1 - F(T))^{N-n} \Leftrightarrow L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i) + (N - n) \ln (1 - F(T)). \quad (8)$$

Перепишем функцию правдоподобия (8), используя выражения плотности распределения Вейбулла [10]

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0}} \quad (9)$$

и функции распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{t^m}{t_0}}, \quad (10)$$

где t_0 — параметр, характеризующий масштаб кривой распределения; m — параметр, характеризующий форму кривой плотности распределения.

Суть метода максимального правдоподобия заключается в том, что в качестве оценок параметров t_0 и m принимаются те величины, при которых функция правдоподобия имеет максимальное значение, а необходимое условие экстремума — равенство нулю градиента функции L .

Следовательно, оценки параметров t_0 и m определим из условий

$$\frac{\partial L}{\partial t_0} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial m} = 0. \quad (11)$$

Получим следующие уравнения для нахождения параметров распределения Вейбулла:

$$\frac{\partial L}{\partial t_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_0} \ln f(t_i) + (N - n) \frac{\partial}{\partial t_0} \times \times \ln (1 - F(T)) = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial m} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial m} \ln f(t_i) + (N - n) \frac{\partial}{\partial m} \times \times \ln (1 - F(T)) = 0. \quad (13)$$

Преобразуем выражение (12):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial t_0} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial t_0} \ln \left(\frac{m}{t_0} t_i^{m-1} e^{-\frac{t_i^m}{t_0^m}} \right) + (N-n) \frac{\partial}{\partial t_0} \times \\ &\times \ln \left(e^{-\frac{T^m}{t_0^m}} \right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial L}{\partial t_0} = -\frac{1}{t_0} + \sum_{i=1}^n \frac{t_i^m}{t_0^2} + \\ &+ (N-n) \frac{T^m}{t_0^2} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Аналогичным образом упростим выражение (13):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial m} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial m} \ln \left(\frac{m}{t_0} t_i^{m-1} e^{-\frac{t_i^m}{t_0^m}} \right) + (N-n) \frac{\partial}{\partial m} \times \\ &\times \ln \left(e^{-\frac{T^m}{t_0^m}} \right) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial L}{\partial m} = -\frac{1}{m} + \sum_{i=1}^n \ln(t_i) \times \\ &\times \left(1 - \frac{t_i^m}{t_0^m} \right) + (N-n) \left(-\frac{T^m}{t_0^m} \ln(T) \right) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Из уравнений (14), (15) можно численно найти искомые оценки распределения Вейбулла для расчета средней наработки до отказа. Алгоритм реализован в математическом пакете. На вход подается вектор наработок до отказа t и продолжительность испытаний T .

Расчет средней наработки до отказа подножки поворотной закрытой. Вычислим точечную оценку средней наработки до отказа подножек в количестве 610 шт. (план испытаний на надежность [NUT]) за продолжительность испытаний в течение 365 дней при условии, что известен вектор наработок до отказа за этот период, по формуле

$$t_c = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right), \quad (16)$$

где $\Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)$ — гамма-функция, где значения параметров t_0 и m получены из уравнений (14) и (15).

При подстановке получаем

$$t_c = t_0^{\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) = 0,88567 \cdot 31\,523\,000^{\frac{1}{2,108}} = 3195,18.$$

Значит, оценка средней наработки до отказа при заданных исходных данных $t_c = 3195$ дней. Полученное значение может быть использовано при переводе данного показателя безотказности в километры пробега исходя из принятого среднесуточного пробега вагона.

Заключение. По итогам исследования был определен фактический закон распределения наработок до отказа подножек поворотных закрытых, соответствующий закону распределения Вейбулла. Кроме того, на основе численных выражений для идентификации параметров данного распределения, полученных методом максимального правдоподобия, был произведен расчет средней наработки до отказа подножек за период испытаний, равный одному году, по данным об их наработках до отказа за актуальный период времени, завершающийся 2017 годом. Полученные значения показателя безотказности поворотных подножек могут быть использованы для решения задач оптимизации процессов в системе технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов с целью сокращения издержек на их содержание в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
2. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
3. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. Практикум. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.
4. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
5. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 238 с.
6. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Новосибирск: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 160 с. (Научная мысль).
7. Буре В. М., Евсеев Е. А. Основы эконометрики: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 72 с.
8. Прикладная статистика в R, Statistica и Excel: описательная статистика, оценивание параметров, статистические критерии: учеб. пособие / В. М. Буре [и др.]. СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2011. 104 с.
9. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: введен 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 1990. 136 с.
10. Косточкин В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. М.: Машиностроение, 1976. 248 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОУСОВА Мария Владимировна, инженер по надежности, ОАО «ПФ «КМТ»

БУЛАТОВ Виталий Владимирович, канд. техн. наук, инженер по надежности, ОАО «ПФ «КМТ»

Статья поступила в редакцию 17.09.2018 г., актуализирована 01.11.2018 г., принята к публикации 10.12.2018 г.

Estimation of the average time to failure of the turning steps according to the operation data

M. V. BELOUSOVA, V. V. BULATOV

Joint Stock Company "KMT Production Company — Lomonosov Experimental Plant" (JSC "PF KMT"), Lomonosov, 198412, Russia

Abstract. The purpose of this study is to determine the empirical law of the distribution of developments to the failure of the turning steps installed on passenger cars of locomotive traction.

The correct choice of the distribution law for each technical product allows for the current calculation of reliability indicators, predicting them, as well as developing preventive measures for a specific technical product and leveling costs both during production and during operation.

The article presents well-founded arguments that the failure time for turning steps is characterized by the Weibull distribution law. For confirmation, a statistical criterion for checking the deviation of the distribution from the normal one was applied.

On the basis of carried statistic analysis a histogram of frequencies and a line of the density function of samples of failure time in the data fixation period from 2010 to 2017 were built. Results of applying the χ^2 agreement criterion in the same software environment revealed that the failure time of the closed turning step comply with the law of Weibull distribution. Authors suggest using the maximum likelihood method to identify Weibull distribution parameters, on the basis of which the value of the point estimate of the mean time to failure is calculated.

Based on the research, it is concluded that this type of distribution law and the process of finding its parameters should be introduced into the program and methodology for assessing the operational reliability of the turning steps, when calculating the average time to failure of the steps, and consider the possibility of applying this law for analogous products.

In conclusion, calculation of the pointed estimation of the average time to failure of the closed turning step was made on the basis of operational tests for one year in accordance with the adopted distribution law.

Keywords: operational reliability; locomotive traction cars; turning step; reliability indicators; average time to failure; Weibull distribution; maximum likelihood method

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-54-58>

REFERENCES

1. Gnedenko B.V. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike. Spravochnik: v 10 t. T. 2. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i effektivnosti* [Reliability and efficiency in technology. Reference book in 10 vol. Vol. 2. Mathematical methods in the theory of reliability and efficiency]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 280 p.

■ E-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru (V. V. Bulatov)

2. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* [Reference book for calculating reliability of radio electronics equipment and automation]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975, 472 p.

3. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum* [Fundamentals of the theory of reliability. Practical work]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2006, 560 p.

4. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p.

5. L'vovskiy E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Statistical methods for constructing empirical formulas. Textbook for universities]. Moscow, Higher school Publ., 1988, 238 p.

6. Lemeshko B. Yu. *Kriterii proverki otkloneniya raspredeleniya ot normal'nogo zakona* [Criteria for checking the deviation of the distribution from the normal law]. Novosibirsk, NITs INFRA-M, 2015, 160 p.

7. Bure V. M., Evseev E. A. *Osnovy ekonometriki. Ucheb. posobie* [Basics of Econometrics. Tutorial]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2004, 72 p.

8. Bure V. M., Parilina E. M., Sedakov A. A., Shevkoplyas E. V. *Prikladnaya statistika v R, Statistica i Excel: opisatel'naya statistika, otsenivanie parametrov, statisticheskie kriterii. Ucheb. posobie* [Applied statistics in R, Statistica and Excel: descriptive statistics, parameter estimation, statistical criteria. Tutorial]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2011, 104 p.

9. RD 50-690-89. *Methodical instructions. Reliability in technology. Methods for assessing reliability indicators based on experimental data. Put into force 01.01.1991*. Moscow, Standard Publishing house, 1990, 136 p. (in Russ.).

10. Kostochkin V. V. *Nadezhnost' aviatsionnykh dvigateley i silovykh ustanovok* [Reliability of aircraft engines and power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 248 p.

ABOUT THE AUTHORS

Maria V. BELOUSOVA,
Reliability Engineer, JSC "PF KMT"

Vitaliy V. BULATOV,
Cand. Sci. (Eng.), Reliability Engineer, JSC "PF KMT"

Received 17.09.2018

Revised 01.11.2018

Accepted 10.12.2018

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Савин А. В. Безбалластный путь. М.: РАС, 2017. 192 с.

Представлена эволюция безбалластного пути как способа уменьшения давления на балласт и уменьшения трудозатрат на текущее содержание, а также рациональные сферы его применения. Выполнено сравнение различных конструкций по объемам укладки в разных странах мира. Описаны конструкции отечественных и зарубежных вариантов безбалластного пути и их классификация, даны технические требования к их отдельным элементам. Также описаны неисправности безбалластных конструкций и способы их устранения в процессе текущего содержания.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников железнодорожного транспорта, будет полезна преподавателям и студентам отраслевых вузов, а также тем, кому предстоит проектировать, сооружать и эксплуатировать безбалластный путь.

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

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Разработка смазочного материала для бортовых гребнерельсосмазывателей тягового подвижного состава

Д. В. ГЛАЗУНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС), Ростов-на-Дону, 344038, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные эксплуатационные требования к смазочным материалам, работающим в условиях колесно-рельсовой трибосистемы. Показано, что ни один из смазочных материалов, используемых в колесно-рельсовой системе, не удовлетворяет температурным условиям эксплуатации тягового подвижного состава.

Для решения данной проблемы в ФГБОУ ВО РГУПС разработан и апробирован в промышленных условиях смазочный материал с расширенным температурным диапазоном работы в условиях колесно-рельсовой трибосистемы. Комплексом экспериментальных исследований и методом ортогонального центрального композиционного плана 2-го порядка установлены оптимальные значения толщины рабочей оболочки смазочного стержня и доля пластичного смазочного материала, позволяющие значительно расширить температурный диапазон работы смазочных стержней и, в частности, полностью исключить течение смазочного материала до достижения максимальной температуры выше 126 °С. Предложенный состав апробирован на электровозе серии ВЛ80Т, оснащенный бесприводными лубрикатрами в условиях участка Северо-Кавказской железной дороги Батайск — Лихая. Интенсивность изнашивания гребней колес тягового подвижного состава, обработанных предлагаемым смазочным материалом, по сравнению с интенсивностью изнашивания гребней колес без использования систем лубрикации снижена в 2 раза.

Ключевые слова: смазочный материал; подвижной состав; колесно-рельсовая трибосистема; промышленные испытания; ортогональный центральный композиционный план 2-го порядка; бесприводной лубрикатор

Введение. Разнообразие условий эксплуатации тягового подвижного состава определяет ряд требований к смазочным материалам, предназначенным для колесно-рельсовой системы.

Выделим следующие основные эксплуатационные требования:

- работоспособность в широком диапазоне температур (от –30 до +85 °С и выше), так как летом в ветреную погоду при температуре окружающего воздуха +50 °С температура колес локомотива и рельсов достигает +72 °С [1], а при напряженном графике движения поездов возрастает до +83 °С [2];
- удельное давление в зоне контакта «колесо — рельс» до 3 ГПа;
- скорость скольжения до 0,8 м/с;

- способность сохранять смазочные свойства после разового нанесения значительное время, или ресурс смазки после разового нанесения (сопротивление истиранию);

- достаточная вязкость и адгезия с металлом, чтобы противостоять сбрасыванию с поверхности гребня колеса и рельса (способность к переносу);

- прочие требования, предъявляемые к колесным и рельсовым смазкам, — биоразлагаемость, противо-задирные и противоизносные свойства смазки и др.

В колесно-рельсовой системе применяют смазочные материалы, агрегатное состояние которых меняется от жидкого до твердого. При оценке лубрикационных свойств этих материалов надо учитывать значительное число факторов, включая влияние окружающей среды, способ нанесения, состояние поверхности рельсов и ряд других [3, 4].

В настоящее время для снижения износа контакта «гребень колеса — рельс» на грузовых электровозах широко применяются лубрикатеры, использующие жидкие смазочные материалы. Основным недостаток таких смазок — возможность попадания на поверхность катания, что приводит к снижению коэффициента сцепления.

Для устранения этого недостатка разработан пластичный смазочный материал РАПС и устройство для его использования (ТУ 3183-002-01116006-04). Однако применение РАПС, как и других пластичных смазок, используемых на железной дороге для колесно-рельсовой системы, ограничено температурами от –45 до +50 °С (табл. 1), что приводит к повышенному износу деталей сопряжения. Вышеперечисленное показывает важность разработки рациональных смазочных материалов и методов их нанесения в условиях работы колесно-рельсовой трибосистемы.

Технические требования, предъявляемые к смазочным материалам. Для обеспечения требуемой долговечности функционирования узла трения следует стремиться к тому, чтобы смазочный материал отвечал условиям работы сопряжения. Выбор типа смазочного материала осуществлялся по данным А. Р. Лансдауна [5, с. 526]. Если тип смазочного материала жестко

■ E-mail: glazunovdm@yandex.ru (Д. В. Глазунов)

Таблица 1

Температурный диапазон работы смазочных материалов,
используемых в колесно-рельсовой системе на сети железных дорог РФ

Table 1

Temperature range of lubricants used in the wheel-rail system
on the railway network of the Russian Federation

№ п/п	Наименование смазочного материала	Конструкции/компании-производители	Температура
1	Пума-МР по ТУ 0254-006-17368431-07	Передвижные вагоны-рельсосмазыватели (конструкции ВНИИЖТ, ВНИКТИ, по проекту 202.00.00.000 РЭ и типа ОЗПМ)	От –30 до +50 °С*
2	КР-400 по ТУ 0254-213оп-01124323-2006	Передвижные рельсосмазыватели (конструкции ВНИИЖТ, эксплуатируемые на Северо-Кавказской железной дороге)	От –20 до +50 °С**
3	МС-27 по ТУ 2113-004-70470322-2009	Передвижные рельсосмазыватели (конструкции ВНИКТИ, эксплуатируемые на Восточно-Сибирской железной дороге, конструкции ВНИКТИ и ЗАО «Фирма Твема»)	От –10 до +50 °С**
4	СВР-500 по ТУ 2421-002-29269674-2013	Стационарные путевые лубрикаторы СПР-02	От –45 до +50 °С***
5	Пума-МГ по ТУ 0254-004-17368431-07	Гребнесмазыватели типа АГС (конструкции «Фромир»)	От –30 до +50 °С*
6	РАПС-1, РАПС-2 по ТУ 0254-001-01116006-2006	Гребнесмазыватели типа ГРС (конструкции ООО «Транс-Триботехника»)	От –40 до +50 °С*
7	СР-КУМ по ТУ 0258-002-62768160-2011	Передвижные рельсосмазыватели (на базе электровозов ВЛ60, в вагонах-рельсосмазывателях типа ВРСМ и конструкции ЗАО «Фирма Твема», эксплуатируемых Забайкальской дирекцией тяги и Забайкальской железной дорогой)	От –45 до +50 °С*
8	СС-1 по ТУ 0254-064-0762060-2004	Бортовые гребнесмазыватели типа ТГСМ (установленные на локомотивы, эксплуатируемые Забайкальской дирекцией тяги)	От –30 до +50 °С*
9	Графитовый концентрат РС-6 «В» и РС-6 «Ву» по ТУ 2113-131-05015182-98	Передвижные рельсосмазыватели (системы ВНИКТИ на базе локомотивов)	От –30 до +50 °С*

* Распоряжение ОАО «РЖД» от 06 октября 2015 г. № 2378р «О применении смазочных материалов для контакта «колесо — рельс» в IV квартале 2015 г».

** Распоряжение ОАО «РЖД» от 20 января 2012 г. № 76р «О допуске к применению смазок КР-400 и МС-27».

*** Распоряжение ОАО «РЖД» от 21 июля 2014 г. № 1692р «О применении смазочных материалов для контакта «колесо — рельс» в III квартале 2014 г».

не predetermined условиями работы смазываемого узла трения или его конструкцией, то выбор типа смазочного материала, по данным А. Р. Лансдауна, может быть осуществлен исходя из соотношения между относительной скоростью перемещения трущихся тел и удельными нагрузками во фрикционном контакте (рис. 1), а также предельными значениями скорости относительного перемещения трущихся тел и нормального давления в контакте.

Разработка смазочного материала. Коллективом ученых ФГБОУ ВО РГУПС проводится активная работа по созданию новых и усовершенствованию существующих твердых и пластичных смазочных материалов в форме блока или стержня [6, 7, 8, 9]. В частности, был разработан и апробирован в промышленных условиях смазочный материал, позволяющий повысить температурный диапазон работы смазки в условиях колесно-рельсовой трибосистемы. Прототипом разработанного смазочного материала являлись смазоч-

ные стержни РАПС. Стержень состоит из полимерной оболочки, в которую помещен смазочный материал, состоящий из термопластичной основы с добавлением двух основных типов присадок функционального назначения: полимерных модификаторов и твердых противозадирных присадок. Термопластичная основа представляет собой сложную смесь высокомолекулярных углеводородов и их неметаллических производных, придающих ей водостойкость, водонепроницаемость и гидрофобные (водоотталкивающие) свойства, но при ограниченном диапазоне рабочих температур.

Из различного ассортимента смазок и термопластичных основ выбрана пластичная смазка «Литол-24». Данная смазка является универсальной, надежной и применимой в различных отраслях промышленности, а также доступной по цене. Она совместима с большинством смазок, обладает хорошей смазочной способностью в довольно широком диапазоне темпе-

ратур (от -40 до $+130$ °С), удерживается на наклонной и вертикальной поверхностях, не выдавливается из контакта, обеспечивая малый расход смазки.

Для разработки термостойкого состава смазочного материала в условиях колесно-рельсовой системы был использован ортогональный центральный композиционный план 2-го порядка (далее — ОЦКП-2) [5, 10, 11].

В качестве натуральных значений входных параметров задавались:

- толщина оболочки смазочного материала (в диапазоне от 0,3 до 0,9 мм);
- доля пластичного смазочного материала в составе РАПС — от 40 до 100 % (табл. 2).

Были выполнены экспериментальные исследования износа оболочки смазочного стержня по толщине и текучести его смазочного материала в зависимости от доли пластичного смазочного материала в составе РАПС [8]. При выборе диапазона варьирования состава смазочного материала мы оперировали технологическим критерием — возможностью получения однородной массы при смешивании компонентов.

При определении оптимального состава смазочного материала методом ОЦКП-2 минимальная доля пластичного смазочного материала составила 40 %, так как по результатам экспериментальных исследований было установлено, что содержание пластичного смазочного материала в составе РАПС ниже этого предела незначительно влияло на расширение температурного диапазона его работы в условиях колесно-рельсовой трибосистемы [8].

Выходным параметром оптимизации была минимальная температура, при которой смазочный материал не теряет свою структуру.

После оценки статистической значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{T} = 136,15 - 4,28x_1 + 25,61x_2 + 2,61x_1^2 + 19,61x_2^2 \quad (1)$$

где 136,15; 4,28; 25,61; 2,61; 19,61 — расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии; x_1 — толщина оболочки смазочного стержня; x_2 — содержание пластичного смазочного материала в составе РАПС.

Проверка на адекватность окончательного уравнения регрессии производилась по F -критерию (критерию Фишера) и заключалась в установлении соотношения между дисперсией адекватности и дисперсией воспроизводимости эксперимента. Удобство использования критерия Фишера состоит в том, что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением. Если рассчитанное значение F -критерия не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной. Координаты точки экстремума (макси-

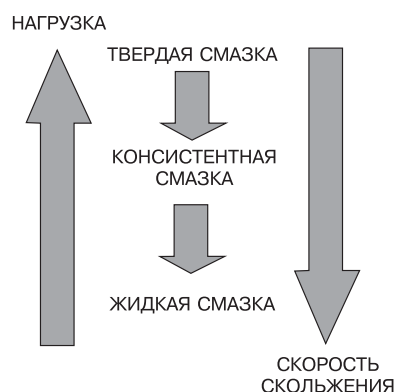


Рис. 1. Выбор типа смазочного материала по А. Р. Лансдауну
Fig. 1. Choice of the type of lubricant according to A.R. Lansdown

муму выпуклости или минимума вогнутости поверхности) функции отклика были установлены путем последовательного дифференцирования уравнения регрессии с последующим приравниванием к нулю частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 4,28 + 2,61x_1 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 25,61 + 19,61x_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В результате решения уравнений были найдены оптимальные значения входных факторов в кодовом виде $x_1 = 0,82$, $x_2 = -0,65$, при которых функция отклика имеет минимальное значение.

Подставив в уравнение регрессии найденные оптимальные значения входных факторов x_1 и x_2 , находим минимальное значение температуры смазочного материала, при которой он сохраняет свою структуру в исследуемом факторном пространстве:

$$T_{\min} = 136,15 - 4,28 \cdot 0,82 + 25,61 \cdot (-0,65) + 2,61 \times 0,82^2 + 19,61 \cdot (-0,65)^2 = 126,034 \text{ °С}. \quad (3)$$

Таблица 2

Натуральные значения входных параметров

Table 2

Natural values of input parameters			
Входные факторы			
Толщина оболочки x_1 (н), мм		Доля пластичного смазочного материала x_2 (С), %	
Нулевой уровень $(x_0)_1$	Интервал варьирования $(\Delta x)_1$	Нулевой уровень $(x_0)_2$	Интервал варьирования $(\Delta x)_2$
0,6	0,3	70	30

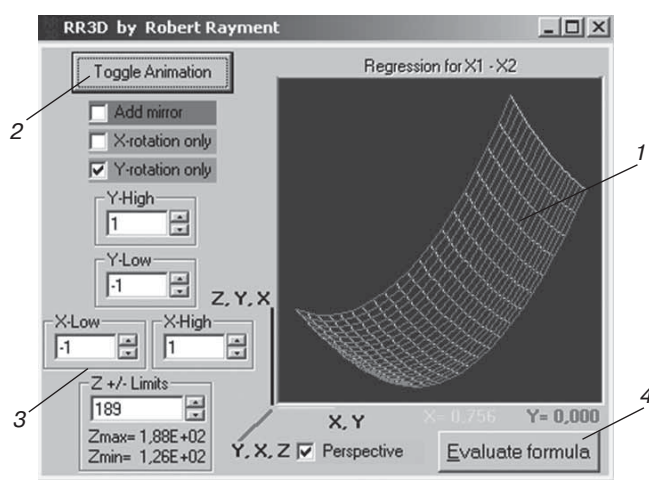


Рис. 2. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии, оценивающего влияние толщины оболочки и процентного содержания пластичной смазки на минимальную температуру:

1 — регрессия по $X_1 - X_2$; 2 — кнопка режима анимации;
3 — пределы X, Y, Z; 4 — расчетная формула

Fig. 2. Geometric interpretation of the regression equation, evaluating the effect of shell thickness and the percentage of grease on the minimum temperature:

1 — $X_1 - X_2$ regression; 2 — animation mode button;
3 — limits X, Y, Z; 4 — calculation formula

Обратный переход от кодовых значений варьируемых факторов к натуральным осуществляется по формуле

$$x_i = x_0 + x_{1,2} \Delta x_i. \quad (4)$$

Натуральные значения координат точки минимума функции отклика равны:

$$n_{\text{опт}} = 0,6 + 0,82 \cdot 0,3 = 0,846 \text{ мм}; \quad (5)$$

$$C_{\text{опт}} = 70 + (-0,65) \cdot 30 = 50,411 \%, \quad (6)$$

где $n_{\text{опт}}$ — оптимальная толщина оболочки смазочного стержня, мм; $C_{\text{опт}}$ — оптимальное содержание пластичного смазочного материала в составе РАПС, %.

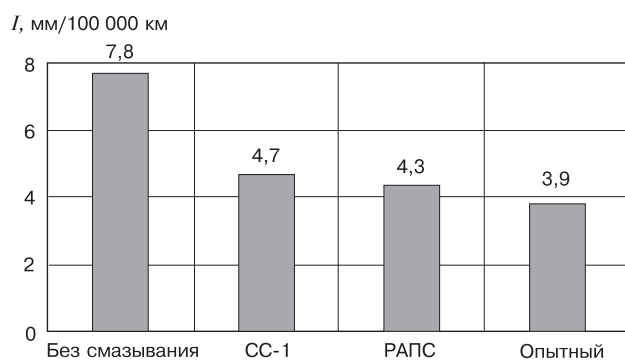


Рис. 3. Интенсивность изнашивания гребней колес (I) при разных условиях смазывания (локомотив ВЛ80Т)

Fig. 3. Intensity of wear of the wheel flanges (I) under different lubrication conditions (VL80T locomotive)

Геометрическая фигура в трехмерной системе координат, представленная на рис. 2, является геометрической интерпретацией уравнения регрессии, отражающего степень влияния входных факторов на выходной параметр оптимизации. По вертикальной оси откладывались значения выходного параметра, минимальной температуры, при которой смазочный материал не теряет структуру (T), соответствующие сочетаниям уровней двух входных варьируемых факторов: толщины оболочки смазочного стержня (n) и доли пластичного смазочного материала в составе РАПС (C) согласно количеству опытов плана эксперимента.

В результате математического планирования эксперимента при помощи ОЦП-2 установлены оптимальные значения толщины рабочей оболочки смазочного стержня, составившей 0,846 мм и процентного содержания (доли) пластичного смазочного материала — 50,411 %, позволяющие значительно расширить температурный диапазон работы стержней и, в частности, полностью исключить течение смазочного материала до достижения температуры 126,034 °С. Дисперсии параметра оптимизации, предсказываемого уравнением регрессии, не зависели от вращения системы координат в центре плана. Следующим этапом исследования была проверка разработанного смазочного материала на соответствие обеспечению требуемого ресурса работы узла трения.

Эксплуатационные испытания смазочных материалов. Промышленные испытания проводились на участке Северо-Кавказской железной дороги Батаяск — Лихая в температурном диапазоне окружающей среды от −30 до +50 °С на грузовом электровозе серии ВЛ80Т, оснащенный бесприводными лубрикаторами ГРС 20.07. В промышленных испытаниях использовались смазочные материалы в форме стержней РАПС, СС-1 и опытный смазочный материал. Максимальная скорость электровоза не превышала 80 км/ч — порожним и смешанным составом или 60 км/ч — груженым составом. Средняя скорость в кривых составляла 34 км/ч. Данные по расходу смазочных материалов и интенсивности изнашивания гребней колес электровоза в исследуемом температурном диапазоне фиксировались в журнале учета.

Для измерения толщины гребня колеса и его износа был использован абсолютный шаблон. Диагностика и измерения основных параметров колесных пар в движении были выполнены автоматическим диагностическим комплексом ARGUS компании Hegenscheidt-MFD. Данный комплекс позволяет осуществлять мониторинг состояния колесных пар после сборки с применением программных средств, исключая человеческий фактор.

Результаты испытаний показали, что наименьший удельный износ гребней колес электровоза ВЛ80Т выявлен при использовании опытного смазочного материала, а температурный предел этого материала позволяет превосходить суммарную температуру, возникающую в колесно-рельсовой системе. Интенсивность изнашивания гребней колес электровоза, обработанных предлагаемым смазочным материалом, по сравнению с интенсивностью изнашивания гребней колес без использования систем смазки снижена в 2 раза (рис. 3).

На основании проведенных исследований предлагаемый состав опытного смазочного материала можно считать наиболее эффективным, препятствующим износу гребня колеса во всем диапазоне исследуемых температур.

Заключение. 1. Рассмотрены смазочные материалы, используемые на железных дорогах России, а также основные эксплуатационные требования, предъявляемые к ним, в результате чего определено, что не существует смазочных материалов, удовлетворяющих требованиям, обеспечивающим эксплуатацию колесно-рельсовой трибосистемы до температуры +85 °С.

2. Для подбора компонентов смазочного материала, работающего в широком диапазоне температур, рассмотрены технические требования, предъявляемые к смазочным материалам.

3. Комплексом экспериментальных исследований и методом ОЦКП-2 разработан смазочный материал, установлены оптимальные значения толщины рабочей оболочки смазочного стержня (0,846 мм) и процентного содержания пластичной смазки (50,411 %), позволяющие значительно расширить температурный диапазон работы стержней и, в частности, полностью исключить течение смазочного материала до достижения температуры 126,034 °С.

4. Результаты эксплуатационных испытаний смазочных стержней показали, что интенсивность изнашивания гребней колес грузового электровоза, обработанных

опытным смазочным материалом, в 2 раза ниже, чем у гребней колес без использования систем смазки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luczak M. Ways to optimize the system «wheel—rail» // *Railway Age*. 2000. № 4. P. 66–67.
2. Huesmann H., Beck A. System of a «wheel—rail» from the standpoint of the permanent way // *Gläser's Annalen*. 2003. № 11/12. P. 524–530.
3. Глазунов Д. В. Исследование значимости факторов, влияющих на ресурс смазочного материала в паре трения «колесо—рельс» // *Вестник машиностроения*. 2017. № 6. С. 63–65.
4. Богданов В. М., Михайлова Н. В. Развитие исследований в области взаимодействия пути и подвижного состава // *Вестник ВНИИЖТ*. 2016. Т. 75. № 4. С. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-256-260>.
5. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для тех. вузов / А. В. Чичинадзе [и др.]. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
6. Петрушин А. Д., Игнатьев О. Л., Глазунов Д. В. Устройство для смазывания открытых узлов трения // *Вестник ВНИИЖТ*. 2017. Т. 76. № 6. С. 348–353. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-348-353>.
7. Разработка оптимального состава смазки, повышающего термостойкость смазочных стержней РАПС / И. А. Майба [и др.] // *Вестник РГУПС*. 2012. № 2 (46). С. 34–42.
8. Майба И. А., Глазунов Д. В. Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте «твердый оболочечный смазочный стержень—колесо—рельс» // *Инженерный вестник Дона*. 2012. Т. 19. № 1. С. 223–232.
9. Смазочный стержень: пат. № 2388635 ФИПС (Роспатент): МПК В61К 3/02 (2006/01) / В. В. Шаповалов [и др.]. Заявл. 13.05.2006; опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.
10. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
11. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ГЛАЗУНОВ Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедры «Тяговый подвижной состав», «Транспортные машины и триботехника», ФГБОУ ВО РГУПС

Статья поступила в редакцию 28.02.2018 г., актуализирована 29.06.2018 г., принята к публикации 30.07.2018 г.

Development of the lubricant for side-mounted rail flange lubricators for traction rolling stock

D. V. GLAZUNOV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Rostov State University of Transport Engineers” (FGBOU VO RGUPS), Rostov-on-Don, 344038, Russia

Abstract. Specificity of operating conditions of the rolling stock defines a number of requirements for lubricants intended for the wheel-rail tribosystem. Lubricants are used for “wheel—rail” contact, the aggregate state of which varies from liquid to solid. When evaluating the lubrication properties of these materials, a significant number of factors must be taken into account, in particular, influence of the environment, method of application, con-

dition of the rail surface. The paper discusses the main operational requirements for lubricants operating in a wheel-rail tribosystem. Temperature ranges of the lubricants used for the “wheel—rail” contact on the railway network of the Russian Federation are given. As a result of the research, it was determined that none of the materials used for lubrication of the wheel-rail system satisfies the operating temperature conditions of the traction rolling stock.

To solve this problem a lubricant was developed and tested in an industrial environment at the Rostov State University of Railway Transport. Its lubricant composition allows to significantly expand the temperature range of the lubricant. Complex of experimental studies and method of orthogonal central composite plan of the 2nd order established the optimum values of the thickness of the working shell of the 0.846 mm lubricating rod and the 50.411 % percentage of plastic lubricant, allowing to extend the temperature range of lubricant rods and, in particular, completely eliminate the lubricant flow to achieve a temperature of 126.034 °C. Proposed composition of the lubricant was tested on a freight electric locomotive of the VL80T series, equipped with non-power lubricators, under the conditions of the Bataysk — Likhaya section of the North Caucasus Railway. Intensity of wear of the wheel flanges of the traction rolling stock lubricated by the proposed material, compared with the intensity of wear of the wheel flanges without the use of lubrication systems is reduced by 2 times.

Keywords: lubricant; rolling stock; wheel-rail tribosystem; industrial testing; orthogonal central composition plan of the 2nd order; gearless locomotor

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-59-64>

REFERENCES

1. Luczak M. *Ways to optimize the system "wheel — rail"*. Railway Age, 2000, no. 4, pp. 66–67.
2. Huesmann H., Beck A. *System of a "wheel — rail" from the standpoint of the permanent way*. Glärsers Annalen, 2003, no. 11/12, pp. 524–530.
3. Glazunov D.V. *Issledovanie znachimosti faktorov, vliyayushchikh na resurs smazochного materiala v pare treniya "koleso — rel's"* [Investigation of the significance of factors affecting the life of a lubricant in a wheel-rail friction pair]. Vestnik mashinostroeniya, 2017, no. 6, pp. 63–65.
4. Bogdanov V.M., Mikhaylova N.V. *Razvitie issledovaniy v oblasti vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava* [Development of research in the field of interaction between track and rolling stock]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 4, pp. 256–260. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-4-256-260>.

5. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka). Ucheb. dlya tekhn. vuzov* [Basics of tribology (friction, wear, lubrication). Textbook for technical universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 664 p.

6. Petrushin A.D., Ignat'ev O.L., Glazunov D.V. *Ustroystvo dlya smazyvaniya otkrytykh uzlov treniya* [Device for lubrication of open friction units]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 6, pp. 348–353. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-6-348-353>.

7. Mayba I.A., Mogilevskiy V.A., Glazunov D.V., Prikhod'ko V.M., Morozkin I.S. *Razrabotka optimal'nogo sostava smazki, povyshayushchego termostoykost' smazochnykh sterzhney RAPS* [Development of an optimal lubricant composition, which increases the heat resistance of RAPS lubricating rods]. Vestnik RGUPS, 2012, no. 2 (46), pp. 34–42.

8. Mayba I.A., Glazunov D.V. *Teoreticheskoe obosnovanie mekhanizma smeshannoy (poluzhidkostnoy) smazki v kontakte "tverdyi obolochecnyy smazochnyy sterzhen' — koleso — rel's"* [Theoretical substantiation of the mechanism of mixed (semi-liquid) lubricant in the contact "solid shell lubricating rod — wheel — rail"]. Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don], 2012, Vol. 19, no. 1, pp. 223–232.

9. Shapovalov V.V., Mayba I.A., Kiryushkin A.V., Shcherbak P.N., Vyalov S.A., Danilevko D.A., Glazunov D.V. *Lubricating rod*. Patent no. 2388635. Moscow, Rospatent, 2010. (in Russ.).

10. Evdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. *Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa* [Planning and analysis of experiments in solving problems of friction and wear]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 228 p.

11. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. Ucheb. posobie* [Methods of experiment optimization in chemical technology. Textbook]. Moscow, Higher school Publ., 1985, 327 p.

ABOUT THE AUTHOR

Dmitriy V. GLAZUNOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Departments "Traction rolling stock", "Transport machines and triboengineering", FGBOU VO RGUPS

Received 28.02.2018

Revised 29.06.2018

Accepted 30.07.2018

■ E-mail: glazunovdm@yandex.ru (D. V. Glazunov)

«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 редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru, <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

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



14-17 МАЯ
МОСКВА
РОССИЯ

2019

Место проведения:
 **ЭКСПОЦЕНТР**
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ И КОНГРЕССЫ
МОСКВА

ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий, материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий, процессов и металлопродукции

Специальная экспозиция



**ТРУБЫ
РОССИЯ
2019**



NI
в мире



При поддержке
The Bright World of Metals

www.metallurgy-russia.ru
www.litmash-russia.ru

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66

Messe Düsseldorf GmbH
Тел.: +49 (0) 2 11/45 60-77 93



**14–17
мая 2019**

Москва
ЦВК «Экспоцентр»
Павильон 8



При поддержке:

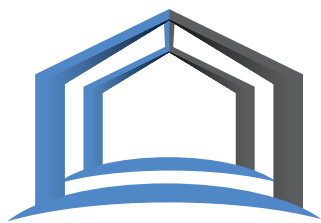
АРСС

Ассоциация развития
стального строительства



РСПМ
Российский союз
поставщиков
металлопродукции

4-я Международная
специализированная выставка



Металло Конструкции 2019

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Организатор:



Оргкомитет выставки:

+7 (495) 734-99-66 | www.mc-expo.ru